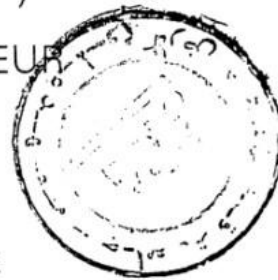


TH-68/84

THESE DE DOCTEUR-INGENIEUR

PRESENTÉE

à l'Université Pierre et Marie CURIE
- Paris 6 -



par Monsieur Abdelmadjid DEMMAK
Ingénieur Hydraulicien ENSEEIHT

pour obtenir le titre de DOCTEUR-INGENIEUR

SUJET DE LA THESE :

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'EROSION ET DES TRANSPORTS SOLIDES EN ALGERIE SEPTENTRIONALE

soutenue le 8 octobre 1982

devant le jury composé de :

M. A. JAUZEIN	Président
M. R. LETOLLE	Examineur
M. J. COLOMBANI	»
M. B. HEUSCH	»
M. D. D. WALLING	»

AVANT-PROPOS

Cette étude sur l'érosion et les transports solides en ALGERIE, n'aurait pu être menée à bien sans la contribution d'un grand nombre de personnes.

Je voudrais tout d'abord remercier Monsieur le Professeur JAUZEIN, pour l'honneur qu'il me fait de présider mon Jury de thèse.

J'adresse également mes vifs remerciements à Monsieur le Professeur LETOLLE, pour m'avoir accueilli au Laboratoire de Géologie Dynamique de l'Université Pierre et Marie CURIE et pour avoir bien voulu juger mon travail et faire partie de mon Jury.

C'est pour moi un grand plaisir de pouvoir exprimer ma profonde gratitude à Monsieur M. ROCHE, Directeur du Service Hydrologique de l'ORSTOM et Monsieur J. COLOMBANI, Chef du Département de la Recherche pour leur soutien scientifique et l'intérêt qu'il ont porté à mon travail.

Une partie importante de ce travail est consacrée à l'Etude des facteurs et mécanismes de l'érosion. Ce travail a été mené à bien grâce aux conseils et orientations de Messieurs B. HEUSCH, J. CAPOLIMI et O. CAYLA, experts à SOGREAH, qui, à l'occasion de nombreuses discussions et visites de terrain, m'ont fait bénéficier de leur expérience et m'ont permis de définir une méthodologie d'étude cohérente. Qu'ils trouvent ici l'expression de mes remerciements.

Je suis redevable à Monsieur le Professeur D.E. WALLING, de l'Université d'EXETER, qui a témoigné beaucoup d'intérêt à mon travail et m'a apporté une aide précieuse pour les recherches bibliographiques.

Je dois une mention particulière à Monsieur J.M. MASSON, de l'Université de MONTPELLIER, à qui je tiens à exprimer ici toute ma reconnaissance pour ses critiques judicieuses et approfondies.

J'aimerais aussi remercier Monsieur le Professeur J. TRICART et Monsieur G. MAIRE, de l'Université de STRASBOURG, pour leurs conseils et observations.

Cette étude a été réalisée au sein de "l'Institut National des Ressources Hydrauliques". Elle a été menée à terme grâce à la compréhension, le soutien et les encouragements de Messieurs K. ACHI et SAFAR ZITOUN, successivement Directeurs Généraux de cet Institut. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je tiens aussi à remercier mes collègues et collaborateurs de "l'Institut National des Ressources Hydrauliques" et plus particulièrement Messieurs OUAAR, NAIT ATHMANE, LAMRAOUI, MAHDID, MEXHOUDI, SALI, ABDOUS, ZOUANE, pour leur très grand dévouement au labeur commun. La réalisation technique de ce travail leur doit beaucoup.

La présentation dactylographique de ce mémoire a été confiée à Monsieur ZERLOUKI qui s'en est acquité avec sa compétence habituelle ; je l'en remercie.

R E S U M E

Un nombre important de données sur les transports solides en suspension des cours d'eau Algériens ont été accumulées durant la décennie 70/80 et ont permis d'entreprendre une étude générale sur l'érosion, les écoulements solides et l'envasement des barrages.

L'objectif de cette étude est d'améliorer la compréhension du phénomène de l'érosion et des transports solides sous climat méditerranéen et semi-aride et mettre au point des outils simples et pratiques permettant l'élaboration des données nécessaires à la planification, l'aménagement et la gestion des ressources hydrauliques.

Une meilleure compréhension du mécanisme de l'érosion et du régime des écoulements solides des cours d'eau peut servir de base pour la définition d'une politique rationnelle de lutte contre l'érosion et l'envasement des barrages et contribuer à la conservation des potentialités hydrauliques dans un pays où l'eau constitue un facteur déterminant du développement économique.

L'étude d'un cas particulier a permis de mettre en évidence l'intérêt :

- d'aborder le problème à l'échelle de l'évènement.
- d'étudier séparément les variables "concentration en matières solides en suspension" et "ruissellement liquide".
- d'associer une étude cartographique des formes d'érosion et des facteurs géomorphologiques à l'analyse hydrologique.

On démontre :

- qu'il existe une corrélation entre la lithologie et les formes d'érosion.

- qu'à chaque forme d'érosion peut être associée une concentration moyenne des charges en suspension.

- que les apports solides ont lieu essentiellement au printemps lors des crues généralisées sur sol saturé, la contribution des crues d'automne, dues à des précipitations intenses et localisées étant négligeable.

- qu'une étude factorielle séparée du ruissellement et de la turbidité améliore la compréhension des phénomènes et permet l'élaboration d'un outil efficace de prévision des apports solides.

La généralisation de ces résultats aux données de débits solides recueillies sur 30 bassins étudiés en Algérie Septentrionale a servi de base pour la recherche de relations empiriques entre apports solides spécifiques et paramètres physico-climatiques des bassins.

La zone étudiée se situe entre le 35ème et le 37ème degré de latitude Nord. La pluviométrie est comprise entre 300 et 1000 mm.

La majorité des bassins s'étendent sur des superficies comprises entre 100 et 3000 km² et peuvent être considérés comme représentatifs des conditions physiques et climatiques de la zone Tellienne de l'Algérie du Nord.

Les transports solides spécifiques moyens annuels des cours d'eau étudiés varient de 30 à 5000 T/km²/an avec des turbidités moyennes annuelles allant de 1 à 40 g/l.

La mise au point d'une relation empirique entre les apports solides spécifiques moyens annuels et des indices lithologiques, pluviométriques et géomorphologiques (coefficient de torrentialité) a permis de synthétiser l'ensemble des résultats.

A B S T R A C T

A large amount of data on suspended solids transport in Algerian rivers has been gathered during the ten-year period 1970/80. This has enabled a general study of erosion, solids transport and silting of dams to be carried out.

The object of this study is to improve understanding of erosion and solids transport phenomena in a Mediterranean and semi-arid climate, and to develop simple and practical methods allowing analysis of the data necessary for planning, construction and management of water resources.

A better understanding of the mechanics of erosion and solids transport in rivers can serve as the basis for defining a rational policy to prevent erosion and silting of dams, and contributing to the conservation of water resources in a country where water is a determining factor in its economic development.

The study of a particular case has shown the need to :

- approach the problem at the level of individual flood events ;
- study separately the variables : suspended solids content and streamflow ;
- relate a map of erosion forms and geomorphological factors to the hydrological analysis.

The study also shows that :

- a correlation exists between lithology and erosion forms ;
- an average suspended solids content can be related to each form of erosion ;

.../...

- solids transport takes place essentially in spring during floods which come from the whole, saturated, basin, the contribution from autumnal localised storm floods being negligible;

- a separate study of factors affecting runoff and turbidity improves understanding of the phenomena and allows development of a useful method for estimating solids transport.

The general application of the results to solids transport data from 30 catchments of Northern Algéria has been used as a basis for obtaining empirical relations between the specific sediment discharge and catchment physico-climatic parameters.

The study zone is located between 35°N and 37°N . Rainfall ranges from 300 to 1000 mm.

The majority of the catchments range from 100 to 3000 km^2 and can be considered representative of physical and climatic conditions of the Tell region of Northern Algeria.

The annual average specific solids transport of the rivers studied varies from 30 to $5.000 \text{ T/km}^2/\text{year}$ with annual average turbidities ranging from 1 to 40 g/l.

The development of an empirical relation between solids transport, lithology index, rainfall index and géomorphological index, has allowed a synthesis of all the results.

INTRODUCTION

L'érosion hydrique est un phénomène complexe très répandu en zone méditerranéenne, touchant particulièrement les pays du Maghreb dont il menace gravement les potentialités en eau et en sol.

I.- ORIGINE ET AMPLÉUR DU PHÉNOMÈNE :

En Algérie septentrionale, les conditions physiques, géomorphologiques, hydroclimatiques et socioéconomiques sont particulièrement favorables au déclenchement et à l'accélération du phénomène.

La lithologie des jeunes massifs plissés de la zone Tellienne constituée à 75% de formations marneuses et argileuses du crétacé supérieur et du tertiaire, offre généralement une structure fragile et une faible résistance aux forces érosives.

Le climat de type méditerranéen est caractérisé par une nette opposition entre saison sèche et humide, faisant succéder une période de précipitations intenses et abondantes à une longue période de chaleur et de sécheresse absolue.

Les pluies supérieures à 30 mm en 24^H sont très fréquentes sur les bassins de l'Atlas Tellien (228 précipitations de ce type ont été observées en 25 ans au poste de KERRATA sur le bassin de l'oued AGRIOUN).

L'irrégularité pluviométrique interannuelle contribue à accroître l'agressivité climatique potentielle particulièrement élevée vis à vis des terrains de cette région.

L'intense réchauffement diurne des sols succédant aux basses températures nocturnes entraîne une intense évapotranspiration potentielle et contribue à désagréger le sol et le préparer au décapage et à l'érosion.

Le couvert végétal, pratiquement inexistant sur les zones marneuses, est généralement peu dense sur les reliefs. Beaucoup de peuplements dégradés ne jouent d'ailleurs que très imparfaitement leur rôle protecteur.

Les facteurs socio-économiques contribuent largement à l'accélération du processus de dégradation des sols. 85% des superficies cultivables en Algérie (soit environ 6 Millions d'hectares) sont situées sur les versants menacés par l'érosion.

Le processus de colonisation, associé à un fort accroissement démographique s'est traduit au cours des siècles derniers par un abaissement dangereux du taux de boisement et une surexploitation des ressources naturelles.

Durant la deuxième moitié du XIXème siècle, plus de 3 Millions d'hectares de forêts ont été détruits par suite de la colonisation des plaines et du refoulement des paysans démunis dans les chaînes boisées. La mauvaise utilisation des terres et le surpâturage ont ainsi entraîné la rupture de l'équilibre écologique naturel.

Les conséquences sur les régimes hydrologiques des cours d'eau sont dès lors inévitables : accroissement de l'irrégularité saisonnière et interannuelle des écoulements, violence et rapidité des crues, importance considérable des transports solides.

Le taux d'érosion spécifique atteint en Algérie les valeurs les plus importantes d'Afrique du Nord. Dépassant $2000 \text{ T/km}^2/\text{an}$ sur la plupart des bassins versants de l'Atlas Tellien (RHIOU, SLY, FODDA, MAZAFRAN, ISSER, SOUMMAM...) il atteint $4000 \text{ T/km}^2/\text{an}$ sur la chaîne des cotiers DAHRA et $5000 \text{ T/km}^2/\text{an}$ sur le bassin très dégradé de l'oued AGRIOUN qui alimente le barrage d'IRHIL EMDA.

On estime à 120 Millions de tonnes, la quantité moyenne de sédiments rejetée en mer chaque année par les bassins tributaires de la méditerranée. Tandis que les cours d'eau à écoulement sporadique qui drainent les bassins endoréiques de hautes plaines transportent annuellement quelques 20 Millions de tonnes de sédiments vers les Chotts.

L'intensité du phénomène se manifeste essentiellement en période de crues. C'est ainsi que les fortes crues de Mars 1974 qui ont touché particulièrement la Région Algéroise ont transité en 3 jours près de 30 Millions de tonnes de sédiments à travers les bassins cotiers de l'Algérois.

Des concentrations supérieures à 200 g/l sont régulièrement observées lors des violentes crues orageuses d'été et d'automne dans les bassins du CHELIFF, du HODNA, de l'ISSER et des AURES.

On peut citer quelques chiffres remarquables :

- 460 g/l le 24/08/1952 sur l'ISSER à la station LA TRAILLE ;
- 674 g/l le 06/10/1957 sur le LEHAM à ROCADE SUD (HODNA) ;
- 387 g/l le 26/09/1971 sur l'ISSER à LAKHDARIA;
- 390 g/l le 11/07/1971 sur le RHIOU à AMMI MOUSSA (CHELIFF) ;
- 407 g/l le 24/09/1975 sur l'oued EL ABIODH à M'CHOUNECHE (AURES).

II.- LES CONSEQUENCES :

Les conséquences de l'érosion sont multiples et bien connues :

- défertilisation des terres de cultures ;
- Envasement des retenues de barrage, des ouvrages de prise et des canaux d'irrigation entraînant la diminution des potentialités hydrauliques ;
- Ensablement des ports ;
- Rehaussement des lits de cours d'eau entraînant un accroissement des risques d'inondation et une menace pour les voies de communication et les ouvrages de stabilisation des lits.

L'envasement des retenues de barrages constitue sans nul doute la conséquence la plus dramatique du phénomène dans cette région où l'eau, de par son insuffisance et sa mauvaise répartition constitue un facteur limitant du développement économique.

L'infrastructure hydraulique Algérienne est amputée chaque année d'un potentiel de réserve équivalent à 20 Millions de mètres cubes.

Durant les 40 années écoulées, on estime à 600 Millions de mètres cubes, la capacité perdue par envasement.

.../...

On peut citer à titre d'exemple quelques chiffres significatifs :

BARRAGE	BASSIN	ANNEE DE MISE EN EAU.	CAPACITE INITIALE (106 m ³)	CAPACITE EN 1967	CAPACITE EN 1977	ENVASEMENT ANNUEL 106m ³	TAUX D'ENVA-SEMENT %
GHRIB	Cheliff	1939	280	185	150	3,4	46%
FODDA	"	1932	228	139	109	2,6	52%
HAMIZ	Cotiers Algérois	1935	21,5	12	17,3 (après dragage)	0,33	51% en 1968 avant dragage(1)
FOUM EL GUERZA	Chott Melrhir	1950	47	35	27	0,74	43%
KSOB	Hodna	1940	11,6	3	29 après surélévation.	0,27	84% en 1976 avant surélévation (2)

(1) Dragage de 8 Hm³ effectué de 1968 à 1971.

(2) Surélévation réalisée en 1977.

Ces chiffres donnent une idée sur l'ampleur du phénomène et la gravité des problèmes qui en découlent.

En effet si on admet que la durée de vie d'un barrage réservoir est la période durant laquelle sa capacité est supérieure à 50% de la capacité initiale, on constate que la majorité des barrages Algériens ont une durée de vie de l'ordre d'une trentaine d'année.

Il est rare cependant, qu'on puisse admettre à l'issue d'une période aussi courte, l'abandon d'un aménagement hydraulique, particulièrement lorsqu'il s'agit de réservoirs destinés à l'irrigation, dont les intérêts socio-économiques justifient une garantie de service illimitée.

Les retenues aménagées étant souvent irremplaçables, les perspectives de surélévation très réduites et les techniques de dragage très coûteuses et très consommatrices d'eau, seule une exploitation dynamique rationnelle pourra contribuer à maintenir une capacité de régularisation satisfaisante.

L'expérience d'IGHIL EMDA en Algérie et du NEBEUR en Tunisie ont montré qu'il est possible d'évacuer 50% des apports solides et accroître d'autant, la durée de vie des ouvrages.

Une telle gestion nécessite cependant une connaissance approfondie des facteurs de l'érosion et du régime des écoulements solides des cours d'eau.

III.- CADRE ET OBJECTIF DE L'ETUDE :

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'une étude générale sur l'érosion, les transports solides et l'envasement des barrages, entreprise à l'Institut National des Ressources Hydrauliques et dont l'objectif à long terme (TAB 1) est de définir une stratégie de lutte contre ces phénomènes.

Dans l'état actuel des connaissances sur le phénomène des transports solides à l'exutoire de bassins de quelques centaines de kilomètres carrés en zone semi-aride, l'objectif de notre travail est relativement simple à formuler :

Elaborer des outils simples, faciles à mettre en oeuvre et directement utilisables par le planificateur, le concepteur ou le gestionnaire des aménagements hydrauliques, pour la prédétermination et la prévision des apports solides en tout point du territoire.

Pour les besoins de la planification, il s'agira d'évaluer correctement les paramètres statistiques des apports solides sur un bassin donné, même dépourvu d'observation.

Il s'agira aussi de localiser les zones du bassin versant qui fournissent la majorité des sédiments en vue de définir une priorité d'intervention.

Pour les besoins de la conception et la gestion, il sera nécessaire de pousser l'analyse des relationsaverse-crue-transport solide à l'échelle de l'évènement.

Une bonne connaissance du régime des écoulements solides à cette échelle devra permettre :

- la mise au point de modèles de simulation dès le stade de la conception pour le dimensionnement optimum des ouvrages ;

- la définition d'un protocole de gestion et de consignes d'exploitation devant tenir compte de la contrainte de lutte contre la sédimentation.

En Algérie, compte tenu de l'accroissement très rapide des besoins en eau, un programme important de mobilisation des ressources superficielles a été entrepris.

Quinze barrages sont actuellement en chantier et une trentaine sont à l'étude.

La complexité et l'urgence des problèmes, l'insuffisance des connaissances de base sur le phénomène des transports solides, l'absence d'outils méthodologiques éprouvés ne permettent pas pour l'instant de s'attarder sur des spéculations purement théoriques dont l'intérêt pratique immédiat n'est pas évident.

IV.- LES CONTRAINTES :

De nombreuses études sur l'érosion et ses conséquences ont été entreprises dans divers pays, mais la complexité du phénomène, son caractère irrégulier et aléatoire n'ont pas permis d'aboutir rapidement à des résultats satisfaisants.

La difficulté de cerner globalement les facteurs qui entrent en jeu et l'interdépendance de ces facteurs rendent difficile la construction de modèles théoriques rationnels et cohérents.

Par suite de la discontinuité spatio-temporelle du processus érosion-transport-sédimentation, il n'existe qu'une relation lointaine et variable entre la quantité de matériel arrachée aux interfluves et celle qui est transportée par le cours d'eau.

L'irrégularité du phénomène rend difficile la mise au point d'une technique de mesure précise, fiable et opérationnelle.

Les méthodes de prélèvements automatiques et d'enregistrement continu se sont avérées inapplicables sur les cours d'eau fortement chargés.

Les prélèvements sporadiques d'échantillons effectués par un observateur sont insuffisants et correspondent rarement aux périodes convenables.

Les concentrations élevées qui constituent la majeure partie des apports solides annuels arrivent durant quelques crues brutales et ne sont mesurées qu'en de rares occasions.

- la définition d'un protocole de gestion et de consignes d'exploitation devant tenir compte de la contrainte de lutte contre la sédimentation.

En Algérie, compte tenu de l'accroissement très rapide des besoins en eau, un programme important de mobilisation des ressources superficielles a été entrepris.

Quinze barrages sont actuellement en chantier et une trentaine sont à l'étude.

La complexité et l'urgence des problèmes, l'insuffisance des connaissances de base sur le phénomène des transports solides, l'absence d'outils méthodologiques éprouvés ne permettent pas pour l'instant de s'attarder sur des spéculations purement théoriques dont l'intérêt pratique immédiat n'est pas évident.

V.- PRINCIPES METHODOLOGIQUES :

Compte tenu du caractère complexe du phénomène, il convient d'éviter de recourir à des modèles sophistiqués, dont le raffinement serait disproportionné à l'information dont on dispose.

Il s'agit de mettre en évidence par des méthodes simples, les variables significatives, indépendantes, capables de résumer l'ensemble des facteurs qui entrent en jeu.

On recherchera des variables faciles à calculer et disponibles en tout point du territoire.

Du point de vue de l'érosion et des transports solides un bassin peut être caractérisé par un grand nombre de paramètres.

On peut envisager d'en retenir le maximum et laisser le soin à l'ordinateur, par l'intermédiaire de regressions progressives par exemple de choisir les plus significatives.

Mais l'usage de l'ordinateur à ce stade pourrait être un frein à l'imagination et la compréhension des phénomènes.

En outre, il est inutile d'introduire de nombreux paramètres ; ceux-ci étant généralement autocorrélés, l'amélioration apparente des corrélations est souvent illusoire.

Nous pensons qu'il vaut mieux n'introduire dans la recherche de relation entre les variables, que des paramètres préalablement testés et dont on peut raisonnablement espérer une influence.

Dans un deuxième stade, les résultats de l'analyse seront contrôlés sur le plan de la réalité physique des phénomènes et les limites d'application de la méthode cernée.

ETUDE GENERALE SUR LES ECOUEMENTS SOLIDS: ORIENTIF ET ORGANISME

— ETUDE GENERALE SUR LES ECOULEMENTS SOLIDES: OBJECTIF ET ORGANIGRAMME

[illegible]

* Les travaux et études mentionnés par un astérisque ont été abordés dans le cadre de la présente étude.

VI.- BREF RAPPEL BIBLIOGRAPHIQUE DES TRAVAUX DE CARACTERE GENERAL EFFECTUES EN ALGERIE.

MEDINGER (Mars 1960) :

MEDINGER, en 1960 procède au traitement et à la mise en forme des premières séries de mesures recueillies en Algérie sur une trentaine de bassins durant la période 1946-1957.

Dans un article paru dans l'annuaire hydrologique de l'Algérie de l'année 58/59, l'auteur discute les méthodes de mesure et présente les données mensuelles des écoulements solides spécifiques des 30 stations observées ainsi que les caractéristiques physiques et climatiques principales des bassins contrôlés.

Dans un tableau récapitulatif, l'auteur donne les estimations des précipitations et écoulements liquides et solides ainsi que les concentrations moyennes et maximales.

Les premiers essais qu'il tente alors en vue d'établir des relations entre débits et concentrations instantanées ne donnent pas de résultats satisfaisants.

TIXERONT (Août 1960) :

Les travaux de TIXERONT sont basés sur les données de 32 bassins d'Algérie et 9 bassins de Tunisie dont les superficies s'échelonnent de 90 à 22.300 km².

L'auteur procède à la corrélation et l'homogénéisation des séries qui figurent dans les annuaires hydrologiques d'Algérie et les recueils d'observations hydrométriques du B.I.R.H. Tunisien.

La correction est effectuée de la manière suivante :

- Réévaluation du débit solide de certains mois où un chiffre a été porté dans les annuaires sans observations précises, lorsque ce chiffre est incompatible avec l'ensemble des observations.

- Extension des moyennes courte durée par corrélation avec les séries longue durée sur des stations d'un même bassin ou de deux bassins voisins.

- Calcul des débits solides en appliquant aux débits liquides journaliers, des taux de concentration moyenne résultant de l'ensemble des analyses sur la base de barèmes mensuels.(1)

Les résultats de l'interprétation des données ainsi révalorisées sont publiés dans un article présenté devant l'Assemblée Générale de l'A.I.H.S d'HELSINKI de Juillet-Août 1960.

Après avoir regroupé les bassins en 3 classes suivant un critère régional (Tunisie, Département de CONSTANTINE, Département d'ALGER), l'auteur essaie de mettre en évidence l'effet relatif des différents facteurs qui entrent en jeu :

- Précipitation et ruissellement annuel.
- Facteurs géomorphologiques (substratum, pente, tectonique).
- Répartition saisonnière des précipitations.
- Climat et couverture végétale.
- Mise en valeur agricole.

(1) Cette méthode a été appliquée sur 2 bassins Tunisiens.

Les principales conclusions des travaux de TIXERONT peuvent être résumées comme suit :

- Les teneurs en suspension des 3 groupes de bassins augmentent d'une façon générale quand le ruissellement diminue.
- La substratum joue un rôle considérable à l'échelle des bassins étudiés, avec en général augmentation de la teneur quand on descend (1) l'échelle stratigraphique. Certains étages manifestent des taux d'abrasion négligeables (crétacé inférieur, jurassique, terrains primaires, cristallin et cristallophyllien).
- Les terrains des régions récemment plissées fournissent des taux d'abrasion et des teneurs en suspension particulièrement élevés.
- Sur les terrains géologiquement stables, il se crée une morphologie qui fait coïncider les zones de forte pente avec les terrains les plus résistants.
- Les bassins à plus forte abrasion se situent dans des régions seismiquement actives.
- La distribution régulière des précipitations avec maximum en pleine saison végétative est favorable aux faibles teneurs.

La distribution la plus favorable est celle qui comporte un maximum en automne.

En se basant sur la répartition pluviométrique annuelle on différencie trois zones :

- Une zone où la pluviométrie, inférieure à 300mm est insuffisante pour causer une érosion appréciable.

(1) En réalité le terme exact serait "quand on remonte l'échelle stratigraphique" (des formations les plus anciennes aux plus récentes).

- Une zone de 300 à 700 mm où l'érosion est très active ($> 1.200 \text{ t/km}^2/\text{an}$).

- Une zone où la pluviométrie est supérieure à 700 mm qui bénéficie d'un couvert végétal protecteur (Erosion $< 350 \text{ t/km}^2/\text{an}$).

CAPOLINI (1965 - 1969) :

A l'occasion d'une étude sur les processus d'érosion actuelle qui conditionne les transports solides des principaux affluents du CHELIFF et l'envasement des barrages existants ou en projet, CAPOLINI entreprend une étude géomorphologique régionale sur ce bassin (physiographie, hypsométrie, pente, formations lithologiques superficielles, couvert végétal).

L'application des techniques de la géomorphologie quantitative basée sur l'analyse morphométrique des réseaux fluviaux (densité de drainage, coefficient de torrentialité) mises au point par les géographes Américains SCHUMM et HORTON et l'Ecole de géographie appliquée de STRASBOURG donne alors des résultats jugés encourageant sur les bassins du RHIOU et du FODDA où il apparaît une bonne corrélation torrentialité-géomorphologie.

Partant de ces résultats qu'il généralise à l'ensemble du bassin de l'oued CHELIFF l'auteur :

- propose une quantification des débits solides en associant à chaque formation lithologique un débit solide spécifique.

- Ebauche une relation statistique entre l'érosion spécifique des bassins et le coefficient de torrentialité.(1)

- Suggère une méthode de cartographie de la susceptibilité à l'érosion à partir de la cartographie du coefficient de torrentialité en partant de l'hypothèse, vérifiée sur les bassins du FODDA et du RHIOU que les zones fortement érodées coïncident avec les zones à fort coefficient de torrentialité.

ETUDE DES AIRES D'IRRIGATION - SOGREAH (Avril 1969).

L'étude est basée sur les données d'observation recueillies au niveau de 9 barrages et 18 stations hydrométriques totalisant 282 années stations. (Les durées d'observations sont très variables).

L'importance des transports solides des oueds est définie en fonction du ruissellement annuel de crue R et de la perméabilité des bassins versants, en admettant que le degré de perméabilité est un facteur qui intègre en première approximation les paramètres géomorphologiques.

Sur un bassin de nature géomorphologique donnée, le transport solide apporté par les crues croît avec le volume ruisselé.

(1) De nombreuses études particulières entreprises ultérieurement confirment en effet que le coefficient de torrentialité, bon indicateur de la physiographie d'un bassin, peut être utilisé comme outil de comparaison entre bassins.

Cependant il a été démontré que ce paramètre, difficile à calculer avec précision, est parfaitement inadéquat pour déterminer les zones d'érodabilité et ne peut ^{être} utilisé seul, pour la prévision des apports solides.

Les résultats sont représentés sous forme d'une relation graphique traduisant des relations de la forme $A = \alpha R^\beta$ inspirées de la formule mise au point par TIXERONT.

avec A : Dégradation spécifique exprimée en $T/km^2/an$.

R : Ruissellement annuel moyen exprimé en mm.

β : 0.15.

α : Paramètre empirique variant avec le degré de perméabilité des bassins de 3,3 (bassin à perméabilité élevée) à 3.200 (bassins imperméables).

L'abaque donne des courbes pour 5 catégories de bassins en fonction de la perméabilité.

Les lacunes de cette étude sont liées :

- à l'estimation du degré de perméabilité :
Rapport entre écoulement de crue annuel moyen et écoulement de base annuel moyen.

(La méthode de séparation des écoulements est sommaire et non justifiée).

- à la méthode utilisée pour l'homogénéisation des séries d'écoulement à partir de séries pluviométriques non homogènes.

PREMIERE PARTIE

MISE EN FORME DES DONNEES DE BASE
BILAN DE 7 ANNEES DE MESURES

INTRODUCTION :

Les premières mesures systématiques et standardisées des transports solides en suspension ont débuté en 1946 à la station hydrométrique de LA TRAILLE qui contrôle le haut bassin de l'oued ISSER (MEDINGER, 1960).

Par la suite, au fur et à mesure de l'équipement des stations, ces mesures ont été étendues à une trentaine de stations sur les bassins des COTIERS CONSTANTINOIS, SEYBOUSE, COTIERS ALGEROIS, CHELIFF, TAFNA, MACTA, HODNA, SOUMMAM.

Après une interruption d'une dizaine d'années, ces mesures ont été reprises en 1970 et étendues à l'ensemble du réseau hydrométrique national.

Un nombre important de données sur les transports en suspension ont ainsi été accumulées durant la période 70/80.

TERMINOLOGIE :

Le transport solide dans un cours d'eau constitue la seconde phase de l'érosion. Il relève essentiellement du ruissellement et met en jeu les diverses formes d'écoulement de l'eau dans la nature.

Il est utile de rappeler la terminologie employée habituellement pour désigner les différents types de transport solide fluvial.

Apport solide - transport solide - débit solide :

C'est la quantité de matériaux transportés par les eaux d'une rivière pendant une période déterminée (exclusion faite des matières dissoutes).

Ces transports se divisent en 2 types principaux :

Le transport par charriage :

Il concerne les gros matériaux qui contribuent à la formation de l'équilibre du lit. Ces éléments sont transportés sur le fond par roulement, glissement, saltation etc....

Le transport en suspension :

Il concerne les éléments fins du transport solide qui sont maintenus en suspension par la turbulence créée par les matériaux du lit.

La quantité de matériaux en suspension dépend essentiellement des quantités d'éléments fins fournis par le bassin versant.

I.- METHODE DE MESURE ET D'EVALUATION :

L'évaluation des transports solides est basée sur 2 types d'actions :

- la mesure directe du taux de remplissage des retenues.
- l'observation du réseau hydrométrique.

1.1.- Méthode basée sur la mesure du taux de remplissage des retenues.

Le contrôle de l'envasement des retenues de barrages est un moyen efficace d'obtenir des valeurs globales sur l'importance du transport de matériaux par les oueds barrés, intégrant l'ensemble des phénomènes du processus érosion-transport solide, y compris le charriage de fond.

1.1.1.- Principe de la méthode :

Un barrage constitue une fosse à sédiments de grande taille. Si l'on contrôle le bilan hydraulique du barrage et la turbidité des volumes d'eau déversés ou soutirés, on peut déduire de l'envasement de la retenue, une valeur moyenne des transports solides sur une période allant de la date de la mise en eau du barrage à la date des mesures d'envasement ou sur une période suffisamment longue comprise entre 2 relevés successifs.

Les méthodes de levé de fond de la cuvette à l'aide d'un écho-sondeur à ultra-sons rendent la mesure simple et rapide.

Les méthodes de dépouillement de ces mesures sont largement décrites dans la littérature (CLAUDE et CHARTIER - 1977).

1.1.2.- Avantages et inconvénients de la méthode :

La mesure directe du taux de remplissage des cuvettes présente trois avantages :

- elle s'adresse au phénomène même qu'on cherche à étudier ;
- elle mesure des quantités totalisées, ce qui élimine pratiquement les erreurs commises sur un relevé ;
- elle intègre dans une certaine mesure le charriage de fond.

Par contre :

- elle néglige en période de crue, les sédiments déversés (la mesure de la turbidité des eaux déversées ou soustrées n'est malheureusement pas effectuée systématiquement) ;
- elle mesure un volume, ce qui rend difficile l'interprétation en ce qui concerne les poids des matériaux transportés. La densité des sédiments en place est mal connue; dès que l'on s'éloigne de la surface des dépôts, la mesure est difficile et fait appel à des techniques très onéreuses ;
- elle se prête mal à une étude physique du phénomène du fait même que l'on mesure des valeurs cumulées par des opérations forcément espacées.

L'estimation des apports solides par des mesures rapprochées perdrait toute précision et reviendrait extrêmement chère.

Notamment l'analyse factorielle de l'érosion et des transports solides utilisant cette méthode ne peut être basée que sur un nombre limité de bassins pouvant difficilement constituer un échantillon représentatif de l'ensemble des conditions naturelles.

En outre, il n'est pas possible d'entreprendre sur la base des résultats de mesure d'envasement de barrage, une étude de la variabilité temporelle du phénomène ; notamment l'évolution d'un bassin à peu de chance d'être perçu dans son influence sur l'érosion.

1.2.- Problème des densité des sédiments déposés :

La nécessité de relier les mesures de transports solides effectuées dans les cours d'eau (mesures pondérales) aux mesures d'envasement de barrage (mesures volumétriques) exige des définitions précises des différentes acceptions du terme "densité".

On part des constatations suivant : (CLAUDE et CHARTIER 1977)

- un sol en place est un mélange de 3 phases ;
terre - eau - air.

- un dépôt de sédiment sous l'eau est une boue plus ou moins consolidée, s'il se trouve hors d'eau il redevient assimilable à un sol.

Si l'on considère un volum V_t de ce dépôt et si on note :

P_t = Poids total du mélange (terre + eau) = $P_s + P_e$

P_s = Poids de sol sec contenu dans le mélange

P_e = Poids de l'eau contenue dans le mélange

V_s = Volume du sol sec

V_e = Volume d'eau

$$V_t = V_s + V_e$$

ρ = densité de l'eau = 1.

On appellera : densité apparente du mélange,

le rapport :

$$D_a = \frac{P_t}{V_t} = \frac{P_s + P_e}{V_t} = \frac{P_s}{V_t} \left(1 + \frac{P_e}{P_s} \right)$$

La connaissance du paramètre $\frac{P_s}{V_t}$ appelée densité sèche du mélange et noté D_s devra permettre de relier les mesures "stations" aux mesures d'envasement de barrage".

Connaissant la valeur moyenne de ce paramètre dans un réservoir dont on a mesuré le volume des dépôts, on pourra en déduire la quantité de sédiments fournie par le bassin, généralement exprimée en $T/km^2/an$.

Inversement on pourra transformer les tonnes de sédiments mesurées à une station hydrométrique en m^3 d'envasement prévisible pour un réservoir en projet.

La connaissance de ce paramètre devra permettre en outre, sur les barrages pourvus d'un contrôle hydrométrique amont et aval:

- d'estimer correctement les apports solides par charriage.

- d'avoir une idée sur l'imprécision des méthodes de mesure et d'évaluation.

Les mesures effectuées en 1961, dans les dépôts du KSOB (SHARVARY, 1980), en 1964 dans les dépôts du HAMIZ et du FODDA (DANIEUX 1971), en 1975 dans la retenue du MELLEGUE (CLAUDE et CHARTIER 1977) et en 1981, dans les dépôts du GHRIB ont mis en évidence une forte variabilité de la densité dans la zone des dépôts.

Les caractéristiques du mélange "eau - sédiment" évoluent dans l'espace sans obéir apparemment à une loi précise.

On observe en moyenne :

- une augmentation de la densité avec la profondeur le long d'une verticale donnée, liée au tassement des dépôts anciens.

- une diminution de la densité moyenne d'une section en travers donnée, de l'amont vers l'aval.

Pour la conception des projets de barrage (calcul de la garde d'envasement), il est généralement admis qu'une tonne de matières solides transitant dans l'oued occupe en moyenne 1 mètre cube de capacité dans la retenue, en partant de l'hypothèse, qu'une boue en place est constituée à 40% de sédiments secs et 60% d'eau ($D_a = 1.6 \text{ t/m}^3$, $D_r = 2.5 \text{ t/m}^3$, $D_s = 1.0 \text{ t/m}^3$).

Ces hypothèses très approximatives, rarement vérifiées par des mesures réelles et complètes de terrain, semblent en tout cas contradictoires avec les observations effectuées en Algérie et en Tunisie.

CLAUDE et CHARTIER (1977) ont montré à partir de prélèvements superficiels effectués dans la retenue du MELLEGUE que la densité sèche serait plutôt de 1.2 t/m^3 (avec une densité apparente de 1.7 t/m^3 et une densité réelle de 2.4 t/m^3).

Les auteurs reconnaissent l'imprécision de ces chiffres et la nécessité d'entreprendre des mesures complémentaires sur des barrages soumis à des conditions différentes.

Un sondage de 32 m de profondeur réalisé dans le FODDA en 1964 montre une augmentation de la densité sèche de 1.38 t/m^3 (en surface) à 1.66 t/m^3 (à 30 m de profondeur).

Huit sondages de 7 à 15 m de profondeur effectués dans les vases du KSOB en 1961 montrent une augmentation de la densité moyenne sur une verticale allant de 1.19 t/m^3 (à 300 m de la digue) à 1.65 t/m^3 (à 6 km de la digue).

Une campagne de sondage et carottage a été entreprise en 1981 sur le barrage du GHRIB (oued CHELIFF), mis en en eau en 1939, envasé à 50%.

Les résultats actuellement disponibles proviennent de 3 sondages profonds effectués en zone dénoyée (entre 12 et 15 km en amont de la digue).

Les densités sèches ponctuelles varient de 1.17 à 1.75 suivant la profondeur et les densités moyennes de 1.35 à 1.42 t/m^3 lorsqu'on s'éloigne de la digue.

La densité sèche moyenne des sédiments déposés dans un réservoir dépend des caractéristiques et des conditions d'exploitation du réservoir. On peut dire d'après les rares mesures effectuées jusqu'à présent que cette densité varie entre 1.2 et 1.4 t/m^3 .

1.3.- Méthode basée sur la mesure de la turbidité au niveau du réseau hydrométrique :

1.3.1.- Intérêt de la méthode :

Cette méthode fait appel à des mesures instantanées, peut être plus astreignantes à la longue que les opérations de relevé des cuvettes ; elle ne concerne que les transports en suspension.

Par contre elle fournit à des intervalles de temps aussi courts que la durée de la crue, des valeurs permettant :

- l'étude de la variation temporelle du phénomène
- l'analyse factorielle des résultats.

Or, l'analyse factorielle si elle est possible constitue un outil de transposition des résultats de mesure directe. Elle peut se traduire en formules, en abaques ou en modèles mathématiques plus complexes permettant d'évaluer les apports solides pour un bassin sur lequel on ne dispose pas de mesure à partir de facteurs géologiques, géomorphologiques et climatiques.

1.3.2.- Evaluation des transports par charriage :

Les phénomènes de charriage sont difficilement accessibles à des mesures directes in situ. Les méthodes basées sur l'utilisation de nasses à graviers sont impraticables sur les cours d'eau à régime torrentiel. celles basées sur l'utilisation de traceurs radioactifs ou luminescents sont pour la même raison assez aléatoires.

Par contre le charriage a fait l'objet de nombreuses études expérimentales en laboratoire. On peut donc dans un cas concret déterminé, utiliser les formules les mieux adaptées aux problèmes à l'aide d'estimation de quelques paramètres propres au cas étudié et déterminer théoriquement le volume de matériaux charriés qui transiteront dans une section donnée de la rivière ou s'arrêteront dans une retenue.

1.3.3.- Mesure des transports en suspension :

Le transport en suspension est plus accessible à la mesure directe dans les conditions naturelles. Le critère le plus représentatif et le plus utilisé pour caractériser le débit solide en suspension est la teneur en matières solides d'un certain débit liquide.

L'évaluation des apports solides en suspension se base sur la connaissance de la variation de la turbidité (concentration en matière solide en suspension) et des débits liquides en fonction du temps.

Le débit solide à un instant donné (noté Q_s et exprimé en kg/s) est égal au produit de la concentration (noté C et exprimé en g/l) par le débit liquide (noté Q et exprimé en m^3/s).

L'écoulement solide mensuel ou annuel généralement exprimé en milliers de tonnes ou en $T/km^2/an$ est calculé en intégrant le débit solide dans le temps.

1.3.4.- Difficulté de la mesure :

La mesure de la turbidité demeure jusqu'à présent basée sur la prise systématique d'échantillon dont la phase solide est séparée.

La difficulté essentielle de la mesure réside dans la non-uniformité de la concentration en sédiment dans la section de mesure et son extrême variabilité temporelle:

Prélevé en surface de l'oued, l'échantillon aura une teneur en suspension moindre que la teneur moyenne de la verticale (sauf zone de prélèvement extrêmement turbulente).

Une cause d'erreur supplémentaire réside dans le fait que le flacon ne comporte pas de tube d'échappement d'air.

L'échantillon prélevé est soumis dès son entrée dans le goulot à une forte turbulence due à l'air qui s'échappe:

Il en résulte une sélection des particules à l'entrée qui se traduit par un échantillon dont la concentration est nettement plus faible que la concentration du milieu qu'il est censé représenter.

1.3.5.- Méthode de mesure basée sur l'exploration du champ de concentration :

On procède à l'aide d'une TURBIDISONDE à des prélèvements d'échantillons en différents points de la section de mesure en prenant les précautions nécessaires de manière à ne pas perturber l'écoulement et à rendre l'échantillon prélevé le plus représentatif possible des conditions naturelles.

On détermine simultanément le champ de concentration $C(x, y)$ et le champ de vitesse $V(x, y)$. Le débit solide est obtenu par intégration double le long de la section de mesure :

$$Q_S = \iint_S C(x, y) V(x, y) dx dy.$$

Cette méthode est astreignante et difficile à mettre en oeuvre.

Elle est généralement utilisable sur les cours d'eau des grands bassins où l'écoulement peut être considéré comme fluvial (bassins de superficies supérieures à 5000 km² par exemple) et où les teneurs en turbidité sont relativement faibles et ne varient que très lentement au cours d'une journée.

Dans ce cas on ne risque pas de grosses erreurs d'interpolation pour l'établissement de la courbe du transport solide en fonction du temps. Par contre, le simple prélèvement en bordure a de fortes chances de ne pas être représentatif de la turbidité moyenne au travers de la section.

Pour les cours d'eau à écoulement torrentiel (bassins montagneux) caractérisés par des variations rapides de débits, les conditions de prises d'échantillons auront beaucoup moins d'importance que la fréquence des prélèvements.

En effet, sur de tels cours d'eau les teneurs en matières solides en suspension sont élevées, le brassage est important et le prélèvement effectué en bordure est généralement représentatif de la turbidité moyenne au travers de la section.

Par contre, la connaissance correcte de la variation temporelle de la turbidité nécessite d'augmenter la fréquence des prélèvements.

1.3.6.- Principe de la méthode opérationnelle :

La technique utilisée est la suivante :

- prélèvement en un point unique soit sur le bord, soit au milieu au moyen du récipient qui sert à stocker les échantillons. Il s'agit généralement de bouteilles en matière plastique d'une contenance de 500 cc.

L'espacement dans le temps des prélèvements doit croître au fur et à mesure qu'on s'éloigne du maximum de la crue jusqu'à atteindre 1 prélèvement par jour lorsque le débit reste constant dans la journée.

Cette méthode, utilisée au Service Hydrologique de façon systématique et routinière sur l'ensemble du réseau hydrométrique depuis plus de 10 années a servi de base à l'élaboration des données de cette étude.

L'évaluation des apports solides journaliers, mensuels et annuels est effectuée de la même façon que pour les apports liquides sur la base d'un dépouillement des enregistrements limnigraphiques suivant un pas de temps d'une demi-heure, d'une heure ou de 2 heures.

Les données sont ensuite perforées et les calculs des débits et des apports solides ainsi que celui des concentrations moyennes journalières, mensuelles et annuelles se font à l'ordinateur.

II.- CALCUL DES DEBITS SOLIDES JOURNALIERS :

(Méthode opérationnelle automatisée).

Prenons par exemple une journée de crue. La base de travail est constituée par :

- le limnigramme
- les résultats d'analyses classés dans l'ordre chronologique dans la fiche "classement et analyse sommaire des prélèvements d'eau (tableau 1.1.).
- le bordereau de dépouillement qui sert en même temps de bordereau de perforation.

2.1.- Tracé du turbidigramme :

Sur la bande limnigraphique on reporte à une échelle que l'on déterminera au préalable sur chaque bande, les résultats des mesures chronologiques de concentrations en sédiment, en positionnant ces valeurs dans le temps.

La courbe de l'évolution des concentrations en fonction du temps (TURBIDIGRAMME) sera tracée en joignant les différents points et en s'inspirant de la courbe limnigraphique.

A cet effet, il faut signaler que le nombre de prélèvements et leur échelonnement correct dans le temps conditionnent exclusivement la fiabilité et la précision du tracé du turbidigramme.

En effet, cette turbidité étant liée à de nombreux facteurs, aucune loi générale ne permet une interpolation sûre entre 2 points de mesure.

Ainsi par exemple, les turbidigrammes résultant de ruissellements localisés sur un bassin donné présenteront des

formes et des intensités très variables suivant le secteur concerné par le ruissellement.

2.2.- Dépouillement et calcul :

On adopte pour la lecture du turbidigramme le même pas de temps que pour les dépouillements des hauteurs d'eau et on remplit la case "turbidité" en notant les valeurs correspondantes lues sur la courbe.

Les débits liquides instantanés (m^3/s) sont transformés en débits solides instantanés (kg/s) en multipliant ces débits par les concentrations correspondantes (g/l).

Un exemple de tracé, de dépouillement et de calcul des débits solides journaliers correspondant à la crue du 17 Octobre 1978 observée à la station de SIDI AKACHA (Oued ALLALAH) est donné ci-dessous :

Le tableau 1.1. reproduit la fiche de classement et analyse sommaire des prélèvements d'eau.

La figure 1.1. reproduit le tracé du limnigramme ainsi que le report des points de prélèvement et le tracé du turbidigramme.

Le tableau 1.2. reproduit le bordereau de dépouillement, de perforation et de calcul (dépouillement au pas de temps horaire).

2.3.- Programme de traitement :

A partir des données de base des fichiers hauteurs d'eau - barème - concentration et d'une carte "demande" le programme de traitement intitulé "ETUSOL" calcule les débits solides journaliers, mensuels, annuels et moyens interannuels et imprime en sortie :

1.- Pour une station donnée et une année donnée les débits solides journaliers (en kg/s, en Milliers de Tonnes/jour, ou en g/l), les débits solides extrêmes et moyens mensuels ainsi que les apports solides mensuels et annuels.

2.- Pour une station donnée et une série d'années de mesures :

- les débits (m^3/s) et les apports liquides ($10^6 m^3$) moyens mensuels, annuels et interannuels.
- les débits (kg/s) et les apports solides ($10^6 T$) moyens mensuels, annuels et interannuels.
- les concentrations (g/l) moyennes mensuelles, annuelles et inter-annuelles.
- les rapports : Apports liquides moyens mensuels/apports liquides moyens interannuels.

Apports solides moyens mensuels/apports solides moyens interannuels.

Les tableaux 1.3, 1.4, 1.5 et 1.6 donnent des exemples de sorties de programmes relatifs à la station de SIDI AKACHA.

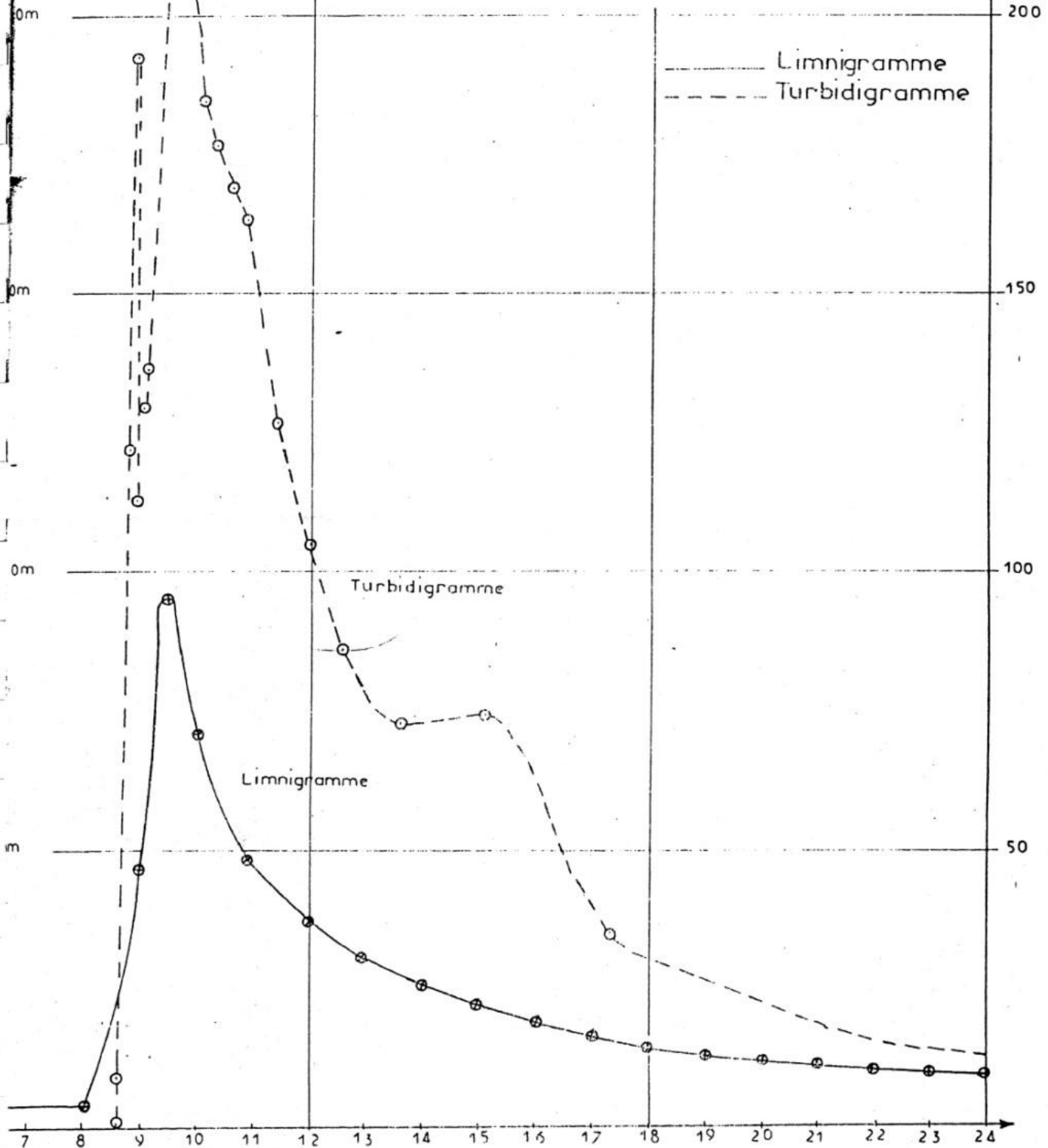
2.1.1.- CLASSEMENT ET ANALYSES SOMMAIRES DES PRELEVEMENTS D'EAU

BASSIN : COTIERS ALGEROIS - OUED : ALLALAH - STATION : SIDI AKACHA.- CODE : 02-02-07.

BASSIN : COULIERS ALGERIJS - DUEZ : ALLALAH - STATION : SIDI AKACHA.- CODE : 02-02-07.														
N°	DATE	HEURE	ECHELLE	CONDUCTIVITE						TRANSPORT SOLIDE				
				TEMPERATURE	LECTURE APPAREIL		CORREC- TION TEM- PERATURE A	CORREC- TION A X K	CONDUCTI- VITE à 25° C=cXAXK	VOLUME EAU + BOUE (cm ³)	POIDS DE BOUE + BUVARD (B) (g)	POIDS DU BU- VARD (p) (g)	POIDS DE LA BOUE P= B-p (g)	CONCENTRATION C= $\frac{P \times 1000}{V}$ (g/L)
					DIRECTE	COEF								
1	17/10/78	8 ^H 00	8	19°2	1,40	1,0	1,131	1,592	2,229	489	3,90	3,85	0,05	0,10
2		8 ^H 20	30		1,44	1,0			2,292	486	4,30	3,60	0,70	1,44
3		8 ^H 25	44		1,38	1,0			2,197	489	8,00	3,40	4,60	9,41
4		8 ^H 40	62		1,12	1,0			1,783	488	63,60	3,95	59,65	122,23
5		8 ^H 50	78		1,08	1,0			1,719	488	98,28	4,00	94,28	193,20
6		8 ^H 55	120		1,10	1,0			1,751	489	59,22	3,65	55,57	113,64
7		9 ^H 00	152		8,50	0,1			1,353	488	66,55	3,52	63,03	129,16
8		9 ^H 05	168		6,80	0,1			1,083	489	70,58	3,75	66,83	136,67
9		9 ^H 40	154		7,80	0,1			1,242	484	120,00	3,75	116,25	240,19
10		9 ^H 50	140		7,40	0,1			1,178	484	105,25	4,00	101,25	209,19
11		10 ^H 05	124		7,30	0,1			1,162	488	94,62	4,15	90,47	185,39
12		10 ^H 20	113		7,65	0,1			1,218	488	89,90	3,45	86,45	177,15
13		10 ^H 35	103		8,00	0,1			1,274	485	85,68	3,52	82,16	169,40
14		10 ^H 55	92		8,00	0,1			1,274	486	83,45	3,98	79,47	163,32
15		11 ^H 25	82	19°2	7,50	0,1	1,131	1,592	1,194	489	66,15	4,20	61,95	126,69
16		12 ^H 00	74	17°5	6,45	0,1	1,175	1,654	1,067	488	55,40	3,88	51,52	105,57
17		12 ^H 40	64		6,20	0,1			1,025	483	45,45	3,48	41,97	86,00
18		13 ^H 40	54		6,50	0,1			1,075	488	39,40	3,82	35,58	72,91
19		15 ^H 10	44		6,30	0,1			1,042	484	39,92	3,90	36,02	74,42
20	17/10/78	17 ^H 20	34		6,25	0,1			1,034	488	20,58	2,30	17,28	35,20

FIG.11 : RECONSTITUTION DU LIMNIGRAMME
ET DU TURBIDIGRAMME CORRESPONDANT
A LA CRUE DU 17/10/78

STATION SIDLAKACHA
OUED AL LALAH
CODE = 02_02_07



HAUTEUR
SALINITE
TURBIDITE

4	8	1	TAB.1.2 : BORDEREAU DE PERFORATION				
5	8	1					
6	8	1					
Carte	Station	Année	Mois	Jour			
En tête commune aux 2 cartes							

MINISTRE DE L'HYDRAULIQUE

D. E. M. R. H.
HYDROLOGIE

HAUTEURS D'EAU - SALINITE - TURBIDITE

du 17 / 10 / 1978

Station : SIDI AKACHA Bassin : COULFER

ROIS

Oued : ALLALAH Sous-Bassin :

Date 17/10/78 Heure 9^H 20 H max 192 cm Q max m³/s

Barème n°

HEURES	HAUTEUR cm	DEBITS m ³ /s	SALINITE (MG)		TRANSPORTS SOLIDES (TS)		OBSERVATIONS
			Kg/m ³ ou g/l	Kg/s	Kg/m ³ ou g/l	Kg/s	
PREMIERE CARTE	0		0		0		
	00	7	0,0		0 1	0,0	
	01	7					
	02	7					
	03	7					
	04	7					
	05	7					
	06	7					
	07	7					
	08	8	0,0		0 1	0,0	
	09	1 0 4	17,00		1 2 9 2	2196,40	
	10	1 4 4	30,80		2 0 3 2	6258,56	
	11	9 9	15,50		1 5 0 0	2325,00	
	12	7 7	9,85		1 0 5 6	1040,16	
	13	6 3	6,49		7 7 5	502,98	
	14	5 1	4,00		7 2 7	290,80	
	15	4 5	2,82		7 5 0	211,50	
DEUXIEME CARTE	QUALITE 7		QUALITE		QUALITE 7		
	16	3 8	1,56		6 2 1	96,88	
	17	3 4	1,03		4 0 5	41,72	
	18	3 1	0,746		3 1 0	23,13	
	19	2 8	0,510		2 7 7	14,13	
	20	2 5	0,300		2 2 8	6,84	
	21	2 4	0,255		1 9 4	4,95	
	22	2 2	0,165		1 6 3	2,69	
	23	2 1	0,120		1 4 2	1,70	
TOTALS : ΣQi		→ 91,146	ΣMG		ΣTS	→ 13017,44	
Débit moyen journalier $Q = \Sigma Qi / 24$		3,80					— 999 = Absence d'observation
Poids totaux en tonnes			$Pi = \Sigma MG \times 3,6$	→	$Pi = TS \times 3,6$	→ 6862,78	
Concentration journalière en g/l			$Ci = \frac{\Sigma MG}{\Sigma Qi}$	→	$Ci = \frac{TS}{\Sigma Qi}$	→ 142,82	

GI/CA/22: 57 4405

REF: 62-62-07

[illegible][illegible]

TYPE-
CONCENTRATION, MOYENNES, DE TURBIDITE 4571

EDJTF LE: 07/07/92

02-C2-C7

1372/73

NOV 10 1970

[illegible]

2.4.- Limites et insuffisances de la méthode :

Les insuffisances de la méthode de calcul utilisée sont liées essentiellement à la variabilité du phénomène dans le temps.

Dans les conditions actuelles de la technique, les méthodes de prélèvements et d'enregistrements continus de la concentration sont inapplicables sur les cours d'eau fortement chargés. Les prélèvements sporadiques d'échantillons effectués soit par un observateur soit par les équipes de mesures durant leurs visites aux stations à des intervalles prédéterminés sont généralement insuffisants et ne correspondent pas aux périodes convenables.

Ce système de collecte d'information conduit inévitablement à un grand nombre de données de concentrations basses et insignifiantes ; les concentrations élevées n'étant mesurées qu'en de rares occasions.

Or, la mesure des concentrations relativement rares et élevées de sédiments est pleinement justifiée du fait que la majeure partie de l'apport solide annuel a lieu durant les crues. Malheureusement les gradients de turbidités sont très élevés et les durées des valeurs maximales de concentration sont généralement très courtes essentiellement sur les petits bassins à temps de réponse très courts.

Le problème se pose même sur des bassins de grandes tailles ; les phénomènes du ruissellement et de l'érosion pouvant réagir différemment, suivant la saison, les caractéristiques des précipitations génératrices (répartition spatio-temporelle) et l'état initial de saturation du bassin.

Cette situation se traduit par des lacunes inévitables au niveau des séries d'observations et la nécessité de faire appel aux courbes d'étalonnage de sédiments.

III.- RECHERCHE DE RELATIONS ENTRE DEBITS SOLIDES ET DEBITS LIQUIDES :

3.1.- Principe et objectif de l'opération :

Ces relations peuvent servir de base pour :

- le comblement des lacunes d'observation et par suite, l'évaluation des apports solides à différents pas de temps.
- l'amélioration des paramètres statistiques des séries courtes de débits solides par corrélation avec les séries longues de débits.
- l'interprétation du phénomène des transports solides.

L'utilisation de courbes d'étalonnage DEBIT LIQUIDE-DEBIT SOLIDE est une méthode utilisée depuis de nombreuses années par différents auteurs.

Apparemment simple en théorie, elle pose en réalité de nombreux problèmes au niveau de l'évaluation critique des données d'entrée et l'appréciation de ses limites d'application.

Par exemple une courbe d'étalonnage élaborée à partir de données instantanées est théoriquement inapplicable au calcul direct des débits solides à partir de débits journaliers sauf pour les journées où les débits sont restés constants.

L'application de cette technique dans notre cas a été abordée de la façon suivante :

Les relations sont établies à l'échelle des débits moyens journaliers.

Pour une station donnée, on sélectionne les journées de crues pour lesquelles un nombre suffisant et représentatif de prélèvements a été effectué permettant une bonne reconstitution du turbidigramme.

On veillera à ce que l'échantillon ainsi constitué ne soit composé que de valeurs strictement indépendantes.

Les couples de valeurs sélectionnées sont reportées sur un papier log-log.

Les tracés graphiques démontrent généralement une dispersion considérable, même en coordonnées logarithmiques. Leur représentation par une droite conduit nécessairement à une simplification du problème et à une estimation arbitraire des effets des différents facteurs.

Le nuage de points dispersés peut être généralement séparé en au moins deux et souvent trois ou quatre groupes de points sur le tracé log-log. Chacun des groupes peut être alors représenté par une relation séparée qui a généralement un coefficient de corrélation plus élevé que la courbe initiale calculée sur l'ensemble des points.

Compte-tenu de l'influence saisonnière sur le phénomène des transports solides, nous avons naturellement cherché à établir des relations saisonnières, afin d'une part d'éviter les trop fortes dispersions, d'autre part de disposer d'échantillons suffisants de couples de valeurs.

Pour les données des stations étudiées des regroupements effectués suivant 4 saisons ont donné des résultats acceptables :

AUTOMNE	(Septembre-Octobre-Novembre)
HIVER	(Décembre-Janvier et Février)
PRINTEMPS	(Mars-Avril et Mai)
ETE	(Juin-Juillet-Aout).

Les relations sont établies à partir d'ajustements de droites par la méthode des moindres carrés sur les nuages de points reportés sur papier logarithmique.

Les relations sont donc de la forme :

$$Q_s = A Q^N$$

3.2.- Exemple de calcul (TAB. 1.7, 1.8, 1.9; Fig.1.2) :

Pour une station hydrométrique donnée, on sélectionne sur l'ensemble de la période d'observation, les journées pour lesquelles il existe des observations consistantes de turbidité (nombre de prélèvements suffisant permettant une reconstitution correcte du turbidigramme).

Le programme recherche dans le fichier des données les débits liquides et solides journaliers correspondants aux dates sélectionnées.

Il sort dans un premier listing les valeurs classées par saison (tableau 1.8).

Pour chaque saison, il calcule les logarithmes décimaux des valeurs, ainsi que les coefficients de regressions et de corrélation des différents ajustements saisonniers.

Les équations de regressions logarithmiques sont de la forme $\log Q_s = A_0 + N \log Q$.

Les relations recherchées seront : $Q_s = A Q^N$

avec $A = 10^{A_0}$.

Un exemple de sortie récapitulative des résultats obtenus est donné dans le tableau 1.9.

Un programme table traçante reporte les points sélectionnés et trace les droites de regressions correspondantes (voir fig. 1.2).

Le tableau 1.10 donne pour toutes les stations étudiées les valeurs de A et N des relations saisonnières ainsi que les coefficients de corrélation correspondants.

Dans un deuxième stade de calcul, les données de débits liquides journaliers permettent de reconstituer les lacunes des débits solides journaliers en utilisant les relations $Q_s = f(Q)$.

Le tableau 1.11 donne le listing définitif des résultats obtenus à la station de SIDI AKACHA après reconstitution des lacunes d'observation.

TAB. 1.7: CALCUL D'UN DEBIT SOLIDE MOYEN JOURNALIER

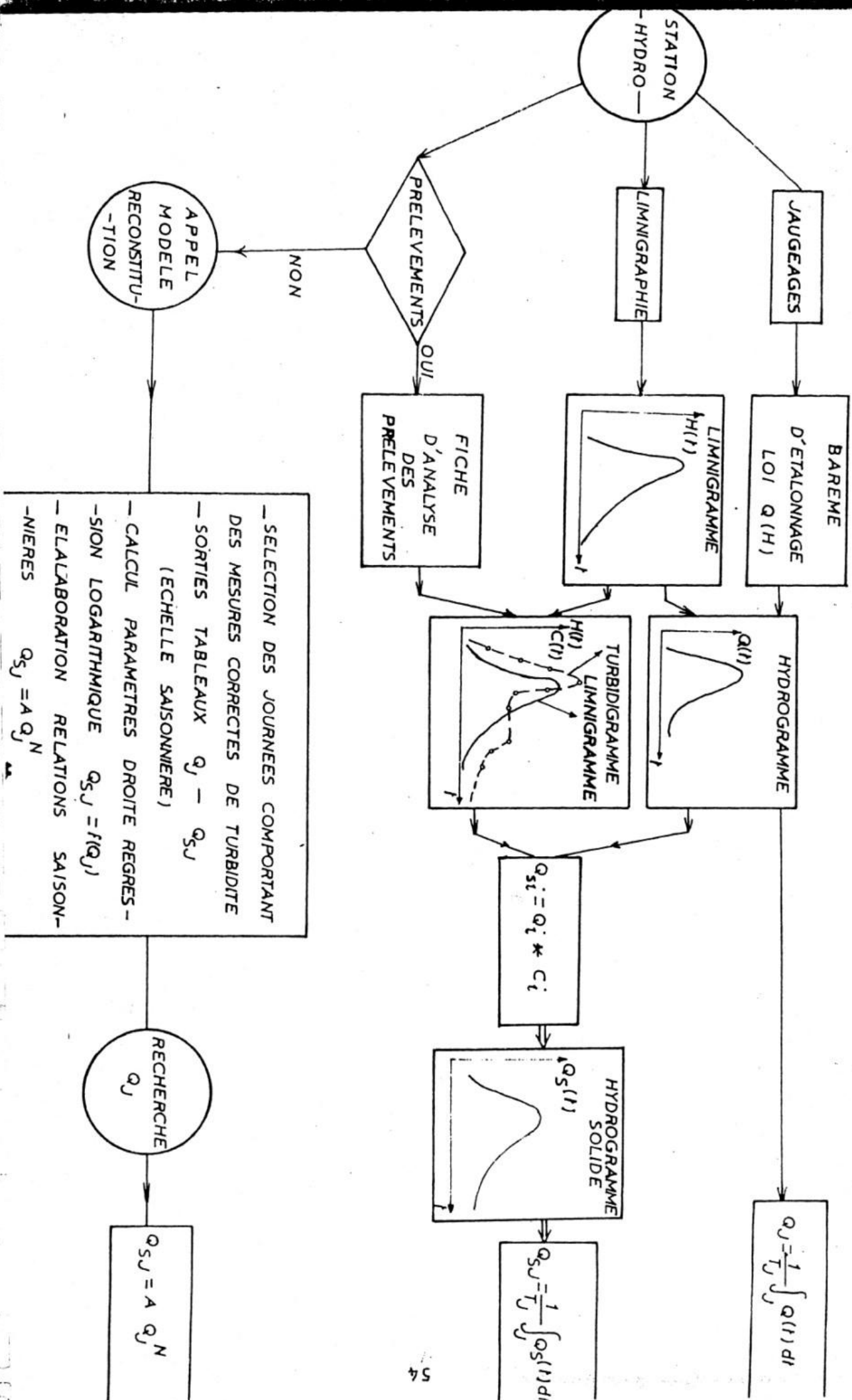


FIG.1.2: RECHERCHE DE RELATIONS SAISONNIERES
DEBITS LIQUIDES DEBITS SOLIDES MOYENS JOURNALIERS

EMPLE : BASSIN DE L'OUED ALLALAH A LA STATION "SIDI AKACHA"
CODE : 02.02.07

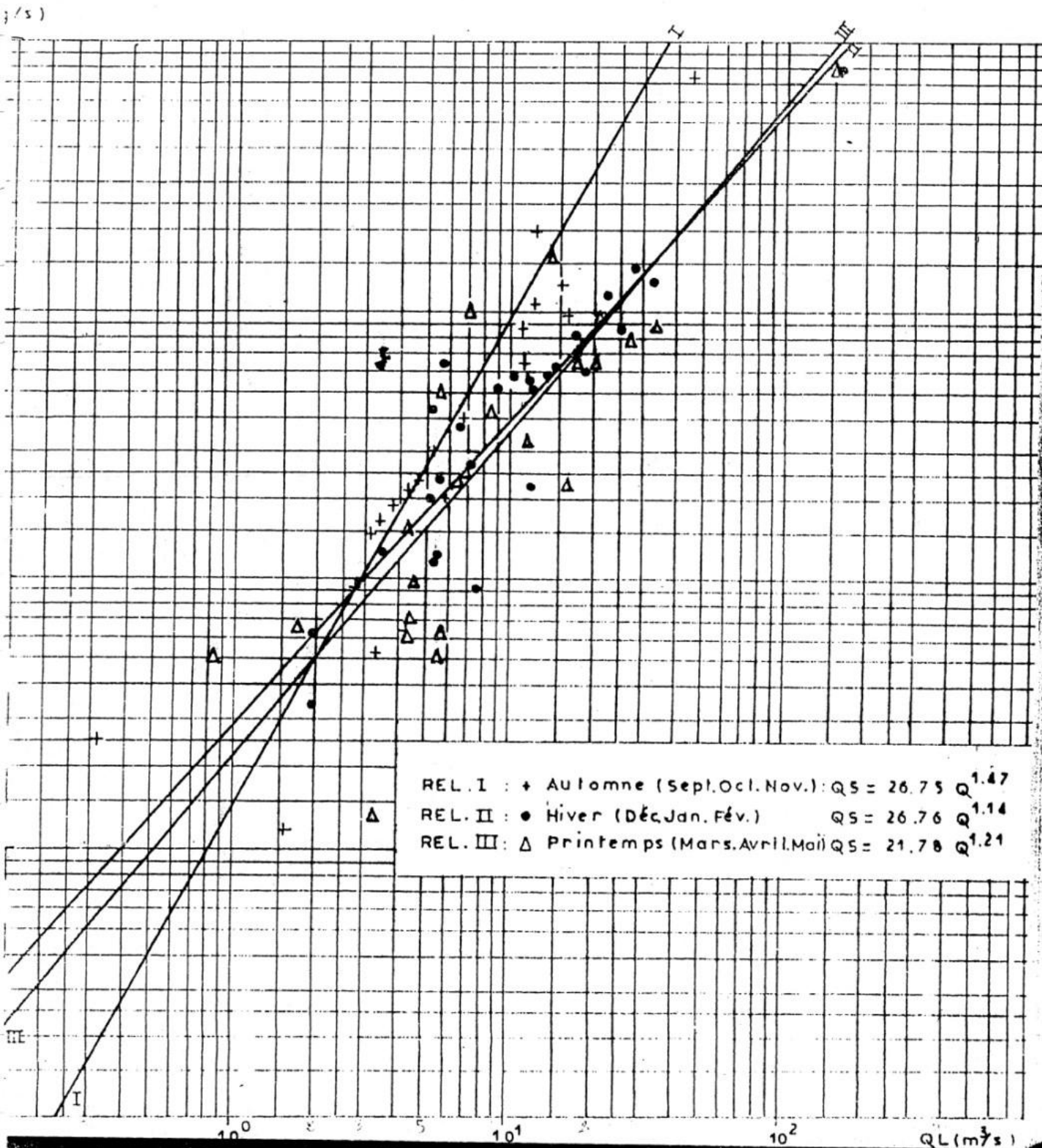


TABLEAU RECAPITULATIF DES PARAMETRES DES RELATIONS SAISONNIERES
DEFINIT L'ETAPE / OBTIENT L'ETAPE AU PAS DE TEMPS JOURNALIER

1 - AUTOMNE
2 - HIVER
3 - PRINTemps
K - TAILLE DE L'ECHANTILLON

[illegible]

IV.- PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE :

4.1.- Choix des bassins :

L'étude est basée sur les données hydroclimatologiques de 30 bassins représentant les différentes régions phytico-climatiques de l'Algérie septentrionale, comprise entre le 35 et 37ème degré de latitude Nord, s'étendant sur environ 300.000 km² au Nord de l'Atlas Saharien. 207 années-stations hydrométriques et 242 années-stations pluviométriques ont été dépouillées et utilisées pour les besoins de cette étude.

Les bassins sélectionnés s'étendent sur des superficies de 90 à 3600 km² et reçoivent des précipitations moyennes variant de 300 à 1.000 mm.

Le contrôle hydrologique est assuré par des stations hydrométriques complètes (limnigraphie - jaugeages - turbidité - caractéristiques physico-chimiques).

La sélection a été effectuée en tenant compte de la consistance et la qualité des données disponibles sur les transports solides.

Parmi les 30 bassins sélectionnés, trois alimentent des retenues de barrages anciens. Ce sont les bassins de l'oued Ksob à MEDJEZ qui alimente le barrage du KSOB. (B. 21).

L'oued Gueiss à FOUM EL GUEISS AMONT (barrage de FOUM EL GUEISS). (B. 27).

L'oued El Abiod à MCHOUNECH (barrage de FOUM EL GUERZA). (B. 24).

Dans ce cas, les données de mesures des stations hydrométriques ont été comparées aux données d'envasement de barrages.

QUEL: ALLIANCE

TOTAUX
ANNUELS

	MOIS	SEPT	OCT	NOV	DEC	JANV	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOÛT	
1-7-77	AL "H3/S"	309	369	0095	555	40496	60375	20667	015	0112	0179	0012	0016	400501 HM3
	AL "HM3"	800	985	0220	10480	120343	150422	70143	10545	0301	0463	0033	0016	240432 G/L
	CM "G/L"	61.141	35.398	40878	370624	310477	230056	170526	0340	0009	750319	0039	0053	33540324 T/KM2
	QS "KG/S"	18.871	13.014	0014	200791	141534	1270853	460735	0203	0002	130457	0003	0000	9330526 MT
	AS "MT"	48.914	40857	10073	550585	379084	3090301	1250184	0542	0003	340608	0001	0001	
1-7-77	AL "H3/S"	149	989	0033	20350	0515	30469	90221	60329	0776	0177	0037	0011	520954 HM3
	AL "HM3"	386	20649	0085	60294	10379	80392	240693	160404	20077	0459	0093	0030	350919 G/L
	CM "G/L"	40.299	750137	0027	350258	30807	300144	310387	180073	0345	0070	0040	0000	76550169 T/KM2
	QS "KG/S"	6.009	740325	0001	820855	10960	1040571	4730866	1140380	0269	0012	0001	0000	22510225 MT
	AS "MT"	15.575	1340072	0002	2200920	50249	2520781	2603202	2960473	0718	0032	0004	0000	
1-7-77	AL "H3/S"	0210	10094	0217	0088	0137	0154	10639	0591	0179	0010	0001	0000	110111 HM3
	AL "HM3"	0052	20931	0563	0235	0567	0373	40550	10531	0480	0027	0003	0000	220122 G/L
	CM "G/L"	5.347	410982	80461	0074	20805	0856	230745	30005	50130	0146	0060	0000	8330176 T/KM2
	QS "KG/S"	0008	450945	10836	0006	0384	0132	400336	20247	0919	0002	0000	0000	2450797 MT
	AS "MT"	0279	1230059	40760	0017	10028	0319	1080035	50825	20461	0004	0000	0000	
1-7-77	AL "H3/S"	0003	0006	10872	10817	0461	130583	0577	0710	10104	0099	0030	0003	510696 HM3
	AL "HM3"	0007	0016	40853	40866	10234	340033	10544	10839	20959	0256	0061	0007	410076 G/L
	CM "G/L"	0133	0072	010123	460920	50208	340627	50348	290383	790339	720875	0292	0229	71380135 T/KM2
	QS "KG/S"	0000	1510889	850243	20400	4700335	00084	210208	870618	70185	0000	0000	0001	21230468 MT
	AS "MT"	0001	3930695	2280314	5042811780472	80260	540972	2340675	180623	0024	0000	0000	0000	
1-7-77	AL "H3/S"	0026	0510	0683	0804	10405	0268	0143	0118	0414	0051	0026	0039	110071 HM3
	AL "HM3"	0009	10366	10770	20152	30763	0048	0384	0305	10108	0133	0070	0000	220794 G/L
	CM "G/L"	6.432	230978	260784	270329	270329	0266	10834	10921	240213	0000	0000	0000	9160859 T/KM2
	QS "KG/S"	0108	120226	180292	210931	390397	0071	0263	0226	130020	0000	0000	0000	2700476 MT
	AS "MT"	0434	320746	470413	580741	1020842	0172	0705	0506	260837	0000	0000	0000	
1-7-77	AL "H3/S"	0000	0001	0869	0256	0914	0172	0424	0573	0107	0001	0000	0000	90753 HM3
	AL "HM3"	0000	0002	20251	0687	20449	0417	10135	20523	0286	0002	0000	0000	450634 G/L
	CM "G/L"	0000	0160	670900	200095	370815	0596	210424	610564	200537	0200	0000	0000	15080722 T/KM2
	QS "KG/S"	0000	0000	580374	50154	340590	0101	90082	590930	20195	0000	0000	0000	4450073 MT
	AS "MT"	0000	0000	1520800	130000	920619	0244	240326	1550337	50880	0000	0000	0000	
1-7-77	AL "H3/S"	0000	20670	0421	0845	0220	90947	80202	0371	0158	0053	0011	0011	500371 HM3
	AL "HM3"	0000	70151	13092	20371	0548	240063	210970	20517	0422	0136	0030	0030	540242 G/L
	CM "G/L"	0000	140469	690487	401178	40388	470405	400704	210513	0059	0234	0023	0000	11100451 T/KM2
	QS "KG/S"	0000	370727	290282	350569	0963	4710526	330877	200894	0000	0012	0000	0000	32740633 MT
	AS "MT"	0000	0000	750898	550267	205811400716	0940255	540156	0025	0052	0001	0000	0000	
1-7-77	AL "H3/S"	0002	0804	0597	0965	10164	40353	30276	10472	0407	0001	0017	0010	350465 HM3
	AL "HM3"	0180	20157	10548	20584	30118	110907	80775	30816	10090	0211	0045	0027	380711 G/L
	CM "G/L"	16.190	400457	160451	290635	160119	190134	230138	190086	180519	210264	0065	0000	46530844 T/KM2
	QS "KG/S"	3.594	700748	370241	350936	310460	1670798	1230607	310279	140433	200553	0002	0000	13720884 MT
	AS "MT"	9.310	2000205	960529	950250	040262	4110743	3470138	810127	380657	700553	0004	0000	
1-7-77	AL "H3/S"	0524	60043	40364	70285	80731	330574	240743	100701	30074	0594	0127	0075	
	AL "HM3"	0678	140583	70031	70011	60134	290591	250295	50009	20816	0507	0000	0000	

Le tableau 1.12 donne les estimations des apports solides effectuées au niveau des 3 barrages réservoirs contrôlés. La confrontation des résultats de ces estimations avec celles obtenues au niveau des stations hydrométriques Amont montre des écarts importants.

Tab. 1.12.: Comparaison des mesures "station" aux mesures "barrage".

OUED	SUPERFICIE	BARRAGE	MISE EN SERVICE	PERIODE D'OBSERVATION	ENVASEMENT ANNUEL	ESTIMATION DE L'APPORT SOLIDE SPECIFIQUE (1).	ESTIMATION A PARTIR DE LA STATION AMONT (7 ans).	POURCENTAGE D'ECART
	Km ²			Années	Hm ³	T/km ² /an	T/km ² /an	
Ksob	1480	KSOB	1940	32	0,27	500	345	- 31%
Gueiss	153	FOUM EL GUEISS	1939	27	0,03	670	197	- 71%
Abiod	1300	FOUM EL GUERZA	1950	17	0,74	870	401	- 54%

On constate à l'examen de ce tableau que les mesures effectuées à partir des stations hydrométriques sous estiment les apports solides totaux.

Les écarts sont importants et ne peuvent pas être expliqués uniquement par la non prise en compte du charriage.

L'incertitude sur la densité des dépôts et sur les volumes en sédiments soutirés ou déversés (1) ne permet pas de tirer de ces observations des conclusions nettes. Ces chiffres montrent cependant le degré d'imprécision des techniques de mesures et d'évaluation.

(1) Ces estimations ont été effectuées à partir des levés topographiques et bathymétriques des dépôts, en considérant une densité sèche égale à 1 T/m³, et en tenant compte des apports soutirés par les vannes de vidange. La mesure des débits solides soutirés comporte cependant de nombreuses lacunes. En outre les volumes des sédiments déversés, n'ont pas été contrôlés durant la période considérée.

4.2.- Représentativité de la période de référence.

La période de référence choisie (1972/79) constituée d'une succession d'années sèches et humides peut être considérée en moyenne comme représentative de la normale.

Les tableaux 1.13 A et 1.13 B ci-dessous, qui récapitulent les données hydro-pluviométriques de 9 postes pluviométriques et 6 stations hydrométriques longue durée réparties sur l'ensemble de la zone d'étude confirment cette tendance.

Tableau 1.13 : Test de représentativité de la période de référence :

A.- PLUVIOMETRIE :

REGION	BASSIN	STATION	CODE	MOY. LONGUE DUREE (1).		MOY. PERIODE REFERENCE: PK 72/79	$\frac{\bar{P}_K}{\bar{P}_N}$
				N (années)	\bar{P}_N (mm)		
I	CHELIFF	OUED FODDA	01-21-08	28	486	530	1,089
II	COTIERS ALGEROIS	HAMIZ Bge.	02-06-02	27	828	767	0,93
		MEDEA	01-15-05	24	763	830	1,088
III	COTIERS CONSTANTINOIS	ZITOUNA	03-06-02	26	1664	1633	0,98
		AIN KERMA	03-16-04	24	970	762	0,78
IV	HODNA	MEDJANA	05-09-06	19	404	347	0,859
		KSOB Bge.	05-10-05	30	262	219	0,84
V	HAUTS PLATEAUX CONSTANTINOIS AURES.	BATNA	07-03-16	25	390	420	1,08
VI	COTIERS ORANAIS TAFNA.	GHAZAOUET	04-01-06	27	389	436	1,12

(1) La période de référence s'étend en moyenne sur 26 ans allant de 1950 à 1979 avec quelques lacunes.

B.- HYDROMETRIE :

REGION	OUED	STATION	CODE	MOYENNE LONGUE DUREE (1)		MOYENNE PERIODE REFERENCE 72/79	$\frac{\bar{A}_K}{\bar{A}_N}$
				N (années)	$\bar{A}_N (Hm^3)$		
I	FODDA	FODDA Bge	01-21-01	22	98,4	95,6	0,97
II	MAZAFRAN	FER A CHEVAL.	02-12-01	17	342,24	319,83	0,93
III	KEBIR OUEST	AIN CHAR-CHAR.	03-11-01	19	146,33	105,33	0,72
IV	KSOB	KSOB	05-09-02	19	44,35	39,62	0,89
V	EL ABIOD	FOUM EL GUERZA	06-15-01	19	21,62	19,56	0,91
VI	ISSER	REMCHI	16-07-03	19	110,77	113,95	1,03

L'examen des tableaux 1.13 A et 1.13 B montre que dans les régions Centre et Ouest (CHELIFF - COTIERS ALGEROIS - TAFNA) la période 72/79 se rapproche de la moyenne longue durée.

Dans les régions de l'Est et plus particulièrement dans les COTIERS CONSTANTINOIS, la moyenne de référence est sensiblement inférieure à la moyenne longue durée

$$\bar{A}_K / \bar{A}_N = 0.72$$

Sur les 30 stations de l'étude 26 ont fonctionné sans lacune sur la période 72/79.

Les stations de ROUINA MINES (Oued ROUINA), RN 25 (Oued ASSIF TALA), MEDJEZ (Oued KSOB) et SIDI OUADAH (Oued SOUBELLA) n'ont pas été observées durant l'année 72/73. Les moyennes, calculées sur une période de 6 ans (72/79) peuvent cependant être considérées comme représentatives de la période de référence, l'année 72/73 présente sur ces bassins une hydraulicité moyenne.

(1) La période de référence longue durée va de 1953 à 1960 et de 1968 à 1979.

4.3.- Caractéristiques physiques générales des bassins :

Les 30 bassins sélectionnés sont reportés sur la carte de situation des bassins versants et des stations hydro-métriques de l'Algérie du Nord (carte N° 1).

Ces bassins peuvent être regroupés en 6 grandes régions suivant leur situation géographique et leurs caractéristiques physico-climatiques. Nous les présenterons en indiquant leurs facies lithologiques dominants et leurs caractéristiques physiographiques et hydropluviométriques principales. Les cartes lithologiques des 30 bassins étudiés sont données en Annexe III. Pour la majorité des bassins ($S < 500 \text{ km}^2$) ces cartes ont été élaborées à partir des cartes géologiques au 1/50.000 et réduites au 1/200.000.

4.3.1.- Caractéristiques lithologiques :

REGION I : CHELIFF :

Les 6 bassins sélectionnés dans cette région à l'exception de l'oued EBDA, alimentent les affluents rive gauche de l'oued CHELIFF qui drainent le massif de l'OUARSENIS. Si l'on excepte les bassins des oueds DEURDEUR et HADDAD constitués essentiellement de calcaire et de grès relativement résistants, les bassins de cette région se distinguent par une forte susceptibilité de l'érosion.

BASSIN N° 1 - Oued DEURDEUR à SIDI MOKREFI : Constitué en majorité de formations résistantes : grès fissurés et calcaire gréseux du miocène (46%), calcaire du crétacé (26%).

Les formations érodables sont limitées aux marnes du crétacé supérieur dénudées qui n'occupent que 15% du bassin.

BASSIN N° 2 - Oued ROUINA à ROUINA MINES : Marnes à bancs calcaires et gréseux du crétacé couvert et relativement protégé (22%) - Flyschs du crétacé découverts et érodables (40%) - Marnes du miocène très érodées (9%).

BASSIN N° 3 - Oued SLY à OULED BEN ABDELKADER :

- Formations très imperméables et érodables : marnes du miocène inférieur et du crétacé supérieur (28%).
- Formations moyennement érodables : marnes à bancs de grès ou de calcaire de l'oligocène et du crétacé supérieur relativement bien couvert (61%).
- Formations résistantes : grès (8%).

BASSIN N° 4 - Oued RHIOU à AMMI MOUSSA :

- Formations résistantes : grès et calcaire miocène : 23,6%.
- Formations érodables : marnes du miocène : 41%.
- Formations moyennement érodables : marnes à bancs calcaires, ou greseux dénudées du crétacé supérieur : 32,6%.

BASSIN N° 5 - Oued HADDAD à SIDI ABDELKADER DJILLALI :

Prédominance de formations résistantes.
Calcaires dolomitiques du Jurassique : 47% - marnes et argiles tertiaire : 19,3%.

BASSIN N° 6 - Oued EBDA à ARIB EBDA : Bassin compact, au relief très prononcé, couvert à 60% (forêt de BOU MAAD)

- Formations résistantes : schistes - calcaire - grès et poulingues du crétacé inférieur et du Lias : 59%.
- Formations érodables : marnes et argile du miocène : 31%.

REGION II : COTIERS ALGEROIS - ISSER :

Cette région cotière, importante du point de vue socio-économique est particulièrement touchée par l'érosion par suite des conditions lithologiques et morphoclimatiques.

Plus de 40% de précipitations annuelles tombent sous forme de pluies supérieures à 20 mm. Les coefficients de ruissellement annuels dépassant en moyenne 30% sont les plus forts de l'Algérie du Nord. L'occupation du sol est très dens,

(forte pression démographique). Les 9 bassins de cette région peuvent être regroupés en 4 zones :

ZONE DES COTIERS DAHRA

BASSIN N° 7 - Oued ALLALAH à SIDI AKACHA : Bassin très érodé constitué à 73% d'argiles helvétiques, de marnes du cartenien et de marnes schisteuses du crétacé supérieur. Les formations résistantes (grès et poudingues du miocène) n'occupent que 17%.

BASSIN N° 8 - Oued HACHEM à BORDJ GHOBRIINI : Formations résistantes : calcaires, grès, schistes du miocène et du crétacé : 69%. Formations érodables : marnes et argiles du tertiaire et du crétacé supérieur 16%.

ZONE DES COTIERS MAZAFRAN

BASSIN N° 9 - Oued BOU ROUMI à TARZOULT : Bassin très érodé, constitué à 71% de marnes et d'argiles du miocène supérieur et du crétacé supérieur. Les formations résistantes (grès et poudingues du miocène) occupent 10% de la superficie.

BASSIN N° 10 - Oued DJER à EL AFFROUN :

- Formations résistantes : (grès et poudingues du cartenien, calcaire du crétacé, du jurassique et du primaire) : 10%.
- Formations érodables : (marnes et argiles du miocène supérieur et du crétacé supérieur) : 50%.

BASSIN N° 11 - Oued CHIFFA à AMONT DES GORGES : Formations résistantes : grès et poudingues du miocène supérieur, calcaire et schistes du crétacé inférieur : 14%.

Les marnes schistoïdes et lentilles calcaires qui occupent 35% du bassin bénéficient d'un couvert végétal dense et sont protégées (forêt du Djebel MOUZAIA), tandis que les marnes et argiles du miocène (30%) qui dominent l'Amont du bassin sont très dénudées et soumises à une forte érosion.

ZONE DES COTIERS MITIDJA

BASSIN N°12 - Oued HARRACH à HAMMAM MELOUANE :

- Formations résistantes : grès, poudingues, du miocène, calcaire marneux du crétacé moyen, schistes crétacé inférieur: 54%.
- Formations érodables : marnes schistoïdes, argiles noires du miocène et du crétacé supérieur : 18%.

BASSIN N°13 - Oued BOU DOUAOU à KEDDARA :

- Formations résistantes : grès et calcaires de l'oligocène, de l'Eocène, du crétacé inférieur et du Lias; schistes du précambrien: 79%.
- Formations érodables : marnes et argiles de l'oligocène et de l'Eocène : 12%.

ZONE ISSER - SEBAOU

BASSIN N°14 - Oued ASSIF TALA à RN 25 :

- Formations résistantes : poudingues, grès du miocène inférieur, grès de l'oligocène, calcaire du jurassique : 37%.
- terrains métamorphiques : 44,2%.
- Formations érodables : argiles de l'oligocène, marnes de l'éocène moyen et du crétacé supérieur : 12%.

BASSIN N°15 - Oued ISSER à LAKHDARIA : Marnes schisteuses du crétacé supérieur très érodables : 26%.

Argiles et sables rouges de l'Aquitanién continental et de l'oligocène (érosion ponctuelle en bad land) : 23%.

Marnes calcaires du crétacé moyen et inférieur couvertes de forêts de pin (résistantes): 38%.

Erosion par sapement de berge très intense.

REGION III : COTIERS CONSTANTINOIS - SEYBOUSE :

Les bassins de cette région sont en majorité constitués de terrains résistants (l'oligocène gréseux peu érodable est très répandu dans cette région).

L'importance et la régularité des précipitations se traduisent par une couverture végétale relativement dense. Les charges annuelles en sédiments ne dépassent pas 2 g/l (à l'exclusion du bassin de l'oued MELLAH à BOUCHEGOUF qui comporte un pourcentage important d'argiles et de marnes).

BASSIN N°16 - Oued KEBIR OUEST à AIN CHARCHAR :

Terrains résistants : poudingue et grès de l'oligocène - calcaire de l'éocène 78% (forêts de l'oued SOUDANE LARSAHAS, FAID ED DEBA).

Terrains érodables : argiles de l'oligocène, marnes du crétacé supérieur : 9%.

BASSIN N°17 - Oued HAMMAM à ZIT EMBA :

Terrains résistants : poudingues pliocène, grès numidien et éocène, schistes et calcaires du crétacé inférieur : 77%.

Terrains érodables : argiles avec alternance de grès du pliocène et de l'éocène : 19%.

BASSIN N°18 - Oued KEBIR EST à AIN EL ASSEL :

Grès quartziteux avec bancs argileux de l'oligocène résistant - couverture végétale dense (forêts de OUERDA et KHANGUET AOUN) : 77%.

Alternances de marnes et de calcaire de l'éocène et du crétacé supérieur, découverts, érodables : 17%.

BASSIN N°19 - Oued MELAH à BOUCHEGOUF :

Terrains résistants : poudingues, grès, argiles de l'oligocène, calcaire de l'éocène, bonne couverture végétale (forêt de BOURE-DINE) : 44%.

Terrains érodables : argiles à gypse du miopliocène, argiles et marnes du crétacé supérieur, complexe détritique argileux du trias : 35%.

BASSIN N°20 - Oued RESSOUL à AIN BERDA :

Terrains résistants : grès numidien, calcaire du crétacé supérieur : 8%.

Calcaire et marnes calcaires du crétacé moyen 31%.

Terrains moyennement résistants : Argiles avec banc de grès du Numidien et de l'éocène moyen : 36%.

REGION IV : HODNA - HAUTES PLAINES SETIFIENNES :

Région essentiellement aride, représentative de la zone des hautes plaines, comprise entre les Atlas Tellien et Saharien se distingue par des altitudes élevées ($\bar{H} > 1.000$ m) et des pentes faibles. Avec une pluviométrie moyenne à peine supérieure à 300 mm, les coefficients de ruissellement des bassins de cette région sont les plus faibles de l'Algérie du Nord (<7%).

BASSIN N°21 - Oued KSOB à MEDJEZ :

Terrains résistants : calcaire et grès du miocène inférieur et l'oligocène : 20%.

Terrains érodables : marnes et argiles du tertiaire et du crétacé supérieur : 38%.

BASSIN N°22 - Oued SOUBELLA à SIDI OUADAH :

Grès oligocène - calcaire de l'éocène et du jurassique : 45%.
(Couvert végétal dense, bonne résistance de l'érosion).

Marnes du miocène et du crétacé supérieures érodées : 16%.

BASSIN N°23 - Oued BOU SELLAM à MAGRAOUA :

Alluvions et dépôts mollassiques calcaire : 53%.

Calcaire, poudingues, grès et argile du tertiaire : 16%.

Marnes noires du crétacé supérieur (absence de couvert végétal) : 26%.

REGION V : AURES :

Cette région englobe deux bassins endoréiques situés de part et d'autre du massif des AURES. Les bassins du flanc Nord alimentent la région des HAUTES PLAINES CONSTANTINOISES (Oued REBOA, GUEISS...), d'altitude élevée dépassant 1.300 m, recevant en moyenne 400 mm de précipitation.

Le flanc Sud est drainé par une succession d'oueds qui s'écoulent parallèlement du Nord au SUD (Oued EL ABIOD et EL ARAB) et alimentent le bassin du CHOTT MELRHIR.

Les gradients altimétriques et pluviométriques sont ici très importants. Les altitudes passent de 2.300 m (altitude maximale) à 150 m (exutoire) et les précipitations annuelles de plus 700 mm en altitude à moins 200 mm de l'exutoire. Le régime hydrologique des oueds est caractérisé par une très grande irrégularité annuelle et interannuelle. La répartition saisonnière des précipitations et du ruissellement (60% des apports liquides et 80% des apports solides sont dues aux crues d'Eté et d'Automne) distingue nettement cette région de la zone Tellienne.

BASSIN N°24 - Oued EL ABIOD à M'CHOUNECH :

Calcaires récifaux et calcaires marneux du crétacé moyen et inférieur (résistants) : 30%.

Calcaire, argile et gypse de l'éocène moyen et inférieur (moyennement érodable, présence de couvert végétal) : 46%.

Argile à gypse de l'oligocène continental (érodable) : 11%.

BASSIN N°25 - Oued EL ARAB à KHANGA SIDI NADJI :

Calcaires récifaux du crétacé moyen (résistants, bien protégés) : 43%.

Calcaires à gypse - marnes calcaires avec lentilles de gypse (peu résistants) : 33%.

BASSIN N°26 - Oued REBOA à REBOA :

Bassin au relief peu accentué constitué en majorité de formations stables : glaciais quaternaire (27%), grès Tortonien (16%), marnes calcaires boisées du crétacé moyen dominant le Sud du bassin (10%).

Les formes d'érosion les plus marquées sont observées dans la zone des argiles silteuses du Tortonien (5%) et des marnes du crétacé supérieur (21%).

BASSIN N°27 - Oued GUEISS à FOUM EL GUEISS AMONT :

Formations stables : glaciais polygénique du quaternaire (42%), calcaires avec alternances de marnes et de grès du crétacé inférieur et moyen (44%).

Formations moyennement érodables : calcaires et marnes du crétacé supérieur (15%).

REGION VI : COTIERS ORANAIS - TAFNA :

Cette région est dominée par le massif jurassique des monts de TLEMCEN constitué de calcaires dolomitiques perméables et très résistants.

BASSIN N°28 - Oued TLETA à GHAZAOUET :

Schistes et terrains volcaniques du primaire (Basalte), calcaires dolomitiques du jurassique (très résistants) : 51%.
Marnes du miocène érodables : 6%. Conglomérat marneux du pliocène marin, moyennement érodable : 21%.

BASSIN N°29 - Oued CHOULY à RN 7 :

Bassin très résistant à l'érosion, constitué à 95% de calcaires dolomitiques du jurassique.

BASSIN N°30 - Oued ISSER à REMCHI :

40% de terrains résistants (grès et calcaires dolomitiques du jurassique).
26% de terrains érodables (marnes du miocène moyen).

4.3.2.- Caractéristiques géomorphologiques et hydroclimatologiques :

Le tableau 1.14 résume les principales caractéristiques physiographiques et hydroclimatologiques des bassins étudiés :

Les caractéristiques physiographiques présentées sont relatives à :

1.- Taille et forme du bassin :

- Superficie : $S \text{ (km}^2 \text{)}$
- Périmètre : $P \text{ (km)}$
- Indice de compacité : $K = 0.28 \frac{P}{\sqrt{S}}$

- Longueur du rectangle équivalent: $L (RE) (m)$
- " du thalweg principal : $L (TP) (m)$.

2.- Relief :

- Altitude moyenne : $\bar{H} (m)$
- " médiane : $H_{0.5} (m)$
- Dénivelé spécifique = $\frac{H_{0.05} - H_{0.95}}{L (TP)} \cdot \sqrt{S} (m)$

($H_{0.05}$ est l'altitude telle que 5% du bassin se trouve à une altitude égale ou supérieure).

- Indice orographique de FOURNIER: $h^2/S (m/km^2)$

avec h = différence entre altitude moyenne et minimale (m), et S superficie (km^2).

3.- Organisation du chevelu hydrographique :

$$\text{Densité de drainage: } D_d = \frac{\sum_{x=1}^K \sum_{i=1}^N L_{x,i}}{S} (km/km^2)$$

(Si x représente l'ordre du cours d'eau variant de 1 à K et i le nombre de cours d'eau de chaque ordre variant de 1 à N).

$$\text{Coefficient de torrentialité : } C_T = D_d \times F1$$

$$= D_d \times \frac{N1}{S} .$$

$F1$ est la fréquence des thalwegs d'ordre 1 (nombre de thalwegs d'ordre 1 par unité de surface).

TABLÉAU 1.16. : CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES ET HYDROCLIMATOLOGIQUES GÉNÉRALES.

R	REGION	CONF	OUED	STATION	CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES										CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES					
					SUPERFICIE (km ²)	PERIMETRE (km)	K _p	I (mm) (km)	H (m)	H _{0,5} (m)	H _{0,52} (m)	L (km)	N _S (m)	L ² /N _S m/km ²	Nd km/km ²	C ₁	P (mm) (12/12)	P ₅ (12/12) (1/1000)		
1	REGION I	01-16-02	DEURDEUR	SIDI MOKRETT	500	89,5	1,12	27,2	1024	1020	610	1450	45	417,6	570,3	2,7	17,8	85,5	0,15	275,4
2	CHLEFF	01-19-06	ROUINA	ROUINA MINES	865	125,0	1,19	41,8	631	590	280	1120	55	649,2	86,2	3,6	25,6	437,6	0,16	1151,1
3	"	01-24-11	SLY	OULED R. AKH	1225	145	1,16	45,5	717	750	590	1035	79	283,5	253,3	4,4	63,2	457,6	0,27	2037,3
4	"	01-26-01	RHIOH	AMMI MOUSSA	1890	190	1,28	66,6	665	785	380	1060	135	190,0	165,8	6,5	45,6	475,2	0,15	1821,7
5	"	01-34-01	HABDAB	S.A.-DJILLALI	470	91	1,26	29,6	592	530	335	930	47	274,5	286,6	2,6	13,5	305,6	0,06	101,4
6	REGION II	01-18-01	ERDA	ARIB ERDA	270	70	1,19	25,5	756	720	600	1190	37	304,2	787,1	5,9	96,6	232,2	0,46	2692,2
7	COTIENS ALGEROIS	02-02-07	ALLALAH	SIDI AKACHA	295	78	1,27	28,7	517	275	115	650	35	260,1	190,4	5,5	26,0	599,6	0,20	4655,8
8	ISSER	02-03-01	HACHEM	BOUJ GHOBRINE	215	63	1,20	21,5	386	280	45	1050	34	431,6	669,7	3,1	27,3	631,0	0,37	1562,1
9	"	02-10-02	BOU BOUMI	TARZOULY	215	60	1,15	18,2	508	480	250	810	42	128,6	700,2	3,6	22,0	652,0	0,22	3353,5
10	"	02-10-07	DJES	EI AFFROUN	395	90	1,27	35,0	513	655	220	950	50	290,2	431,8	2,5	16,0	581,6	0,23	1728,6
11	"	02-11-26	CHIFFA	MONT DES GORRES	316	73	1,17	25,5	833	810	475	1255	35	496,2	933,1	3,3	30,0	870,7	0,42	2661,5
12	"	02-13-01	EL HARRACH	HAMMAN MELOUANE	387	75	1,06	19,7	830	840	595	1200	35	455,2	1170,4	5,2	49,2	829,7	0,40	1630,5
13	"	02-06-07	DOU DOUADJI	DOU DOUADJI	93	37	1,07	9,6	666	600	125	865	22	117,8	1772,6	3,9	46,1	851,6	0,36	619,7
14	"	02-19-09	ASSIF TAL	R.N.25	300	73	1,20	26,9	675	690	195	1425	36	596,2	1008,3	1,9	6,7	782,0	0,33	805,6
15	"	02-05-01	ISSER	LAKHADA	1615	220	1,26	28,2	750	820	415	1250	200	251,0	120,5	3,6	29,5	466,0	0,25	1731,6
16	REGION III	03-11-01	ERIR QUESTAIN	CHARCHAR	1130	137	1,14	40,8	278	255	55	650	58	364,9	56,7	2,6	12,2	602,3	0,15	91,6
17	COTIENS CONSIAN-JIRDIS	03-11-02	HAMMAN	ZIT ENNA	485	94	1,20	31,7	376	340	105	795	35	339,0	219,1	2,8	15,1	596,5	0,12	197,5
18	SEKADJUSE	03-14-01	KEDIR FST	AIN EL ASSEL	680	115	1,23	40,9	398	333	85	820	50	386,1	199,2	3,0	16,3	863,6	0,33	905,3
19	"	14-05-01	MELAH	BOUCHEGOUF	550	120	1,45	48,7	641	610	215	1100	51	407,0	542,0	4,0	25,2	588,1	0,27	715,8
20	"	14-06-02	BESSOUL	AIN BERDA	103	45	1,24	16,1	505	275	95	585	24	678,8	606,8	2,8	17,6	601,6	0,16	214,1
21	REGION IV	05-02-01	PSOH	MEBJEZ	1330	165	1,27	60,5	1080	1150	210	1585	73	339,7	147,6	4,0	25,2	516,0	0,07	517,8
22	MOHNA-HAIES FLAT MES-SELIERNES	05-11-01	SOUHILLA	SIDI OUADAH	176	63	1,35	24,2	1153	1140	880	1575	55	279,4	1115,1	2,3	6,0	422,1	0,06	35,7
23	"	15-07-02	BOU SELLAL	M. MAGRAOHA	2350	200	1,16	62,2	1000	1125	920	1410	90	263,9	28,8	3,2	17,8	598,0	0,06	99,1
24	REGION V.	06-15-02	EL ARIDJ	MEHOUCHE	1050	160	1,38	65,5	1490	1400	630	1860	85	469,8	1360,0	6,7	37,9	208,8	0,06	401,2
25	AURES	06-18-01	EL ARAB V	KHANCA S. NAB	2085	200	1,23	20,4	1105	1200	700	1720	112	415,9	601,6	4,8	36,6	560,2	0,05	559,1
26	"	07-04-01	BERDA	BERDA	276	80	1,30	30,2	1620	1655	1060	1890	40	397,9	540,5	2,2	7,3	583,8	0,18	593,6
27	"	07-07-02	GUEISS	E. EL-GUEISSA	164	68	1,12	12,0	1305	1225	1015	1750	19	654,7	733,5	2,7	12,2	650,3	0,15	196,7
28	REGION VI	08-01-01	ELETA	CHAZAQUET	100	40,5	1,13	11,7	364	280	155	865	19	584,2	894,0	3,2	12,1	671,7	0,16	296,9
29	COTIENS ORANAIS	14-06-01	CHOULY	CHOULY R.R.7	170	40	1,25	21,7	1355	1266	870	1695	30	271,6	1550,0	3,0	21,6	562,3	0,19	75,2
30	TARNA	16-07-01	ISSER	BEMCHI	1755	180	1,14	89,9	720	640	250	1330	126	572,1	208,4	2,6	11,1	486,4	0,12	116,5

V.- ESSAI PRELIMINAIRE D'INTERPRETATION :

Il apparait à l'examen du tableau 1.14 que les caractéristiques physico-climatiques des 30 bassins étudiés présentent un large spectre de variation.

On constate que les 15 premiers bassins (régions CHELIFF et Cotiers ALGEROIS) produisent des débits solides importants ($TSS > 1.000 \text{ T/km}^2/\text{an}$).

Les 15 autres bassins (cotiers CONSTANTINOIS, HODNA, TAFNA) paraissent relativement moins érodables (transports solides spécifiques inférieurs en moyenne à $500 \text{ T/km}^2/\text{an}$). Ces derniers sont pourtant soumis à des conditions physiques et climatiques très variables.

Il est intéressant d'entreprendre de ces conditions une étude factorielle du phénomène, afin de mettre en évidence les principaux facteurs qui entrent en jeu, leur degré de signification, les liaisons susceptibles d'exister entre les variables.

Une première analyse en regression multiple est effectuée en considérant l'ensemble des paramètres morphométriques et hydroclimatologiques calculés (superficie, altitude moyenne, dénivellée spécifique, densité de drainage, coefficient de torrentialité, pluviométrie, débit, transports solides).

Les résultats obtenus sont pour le moins décevants. L'examen du tableau 1.15 montre que :

- Les coefficients de corrélation sont en général faibles.

- Les liaisons précipitation-débit liquide-débit solide à l'échelle annuelle ne sont pas significatives.

- Une certaine autocorrélation existe entre les variables explicatives.

- Le coefficient de torrentialité est le paramètre géomorphologique le mieux corrélié avec les écoulements liquides ($R = 0,48$) et solides ($R = 0,42$).

13.1.15.1.- REGRESSION MULTIPLE

VARIABLE	1	SUPERFICIE	#S
VARIABLE	2	ALTITUDE	#HMOY
VARIABLE	3	DENIVELEE SPECIFIQUE	#DS
VARIABLE	4	COEFFICIENT OROGRAPHIQUE DE FOURNIER #H2/S	
VARIABLE	5	DENSITE DE DRAINAGE	#DD
VARIABLE	6	COEFFICIENT DE TORRENTIALITE	#CT
VARIABLE	7	PLUIE MOYENNE (THIESSEN)	#PMOY
VARIABLE	8	LAME ECOULEE MOYENNE	#LE
VARIABLE DEPENDANTE		TRANSPORT SOLIDE SPECIFIQUE	#TSS

MATRICE

1	2	3	4	5	6	7	8	9
500.0	1024.0	417.4	570.3	2.7	17.8	563.6	85.5	273.4
865.0	631.0	449.2	86.2	3.6	25.4	417.4	67.6	1151.1
1225.0	717.0	283.5	253.3	4.4	63.2	457.6	122.0	2037.3
1890.0	665.0	190.0	145.8	4.3	45.6	375.2	56.1	1821.7
470.0	592.0	274.5	286.6	2.6	13.3	305.4	17.0	103.4
270.0	736.0	304.2	787.1	4.9	94.6	737.2	338.3	2492.9
295.0	317.0	260.1	190.4	3.5	24.0	599.4	120.2	4653.8
215.0	386.0	431.4	649.7	3.1	27.3	631.0	235.0	1542.1
215.0	508.0	128.6	700.2	3.4	22.0	652.0	146.0	3353.5
395.0	513.0	290.2	431.8	2.5	16.0	581.6	131.0	1728.6
316.0	833.0	396.2	933.1	3.3	30.0	870.7	367.4	2461.3
387.0	830.0	455.2	1170.4	5.2	69.2	829.7	332.1	1630.3
93.0	466.0	317.8	1772.4	3.9	46.1	851.6	310.4	639.7
300.0	625.0	594.2	1008.3	1.9	6.7	782.0	256.3	805.6
3615.0	750.0	251.0	120.5	3.6	29.5	466.0	105.8	1711.6
1130.0	278.0	344.9	56.7	2.6	12.2	602.0	89.6	91.6
485.0	376.0	339.0	219.1	2.8	15.1	594.5	74.2	197.5
680.0	398.0	386.1	199.2	3.0	16.3	863.6	138.0	903.3
550.0	641.0	407.0	542.0	4.0	25.2	558.1	130.4	714.9
103.0	305.0	478.8	606.8	2.8	17.4	601.4	97.5	214.1
1330.0	1080.0	339.7	147.6	4.0	25.2	314.0	20.8	344.0
176.0	1153.0	279.4	1115.1	2.3	6.0	322.0	10.9	35.7
2350.0	1000.0	263.9	28.8	3.2	17.8	398.0	17.2	99.1
1050.0	1490.0	449.8	1360.0	4.7	39.9	298.8	17.4	401.2
2085.0	1105.0	415.9	401.6	4.8	36.4	340.2	16.5	539.1
296.0	1420.0	397.9	540.5	2.2	7.3	420.4	10.9	593.6
144.0	1305.0	454.7	733.5	2.7	12.2	459.3	10.4	196.7
100.0	364.0	384.2	894.0	3.2	12.1	471.7	13.4	294.9
170.0	1235.0	271.6	1530.0	3.0	21.6	542.1	15.0	75.2
1935.0	720.0	377.1	208.4	2.6	11.1	486.6	18.9	116.5

COEFFICIENTS DE CORRELATION SIMPLE

TAB.1.15.2.

1.00									
0.15	1.00								
-0.25	0.12	1.00							
-0.54	0.29	0.21	1.00						
0.26	0.12	-0.12	0.11	1.00					
0.07	0.03	-0.14	0.20	0.85	1.00				
-0.41	-0.47	0.20	0.33	-0.00	0.24	1.00			
-0.37	-0.32	0.20	0.40	0.21	0.47	0.92	1.00		
-0.07	-0.32	-0.38	-0.10	0.33	0.42	0.35	0.42	1.00	

PALIER NUMERO 1 VARIABLE INTRODUITE 8
 ECART-TYPE RESIDUEL : 1029.489
 COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE : 0.421
 TEST GLOBAL D AJUSTEMENT, F(1 28)= 6.03
 TERME CONSTANT = 475.4665
 VAR COEFF ECART-TYPE T STUDENT BETA
 8 4.3580 1.7745 2.4558 0.4210

PALIER NUMERO 2 VARIABLE INTRODUITE 3
 ECART-TYPE RESIDUEL : 893.365
 COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE : 0.634
 TEST GLOBAL D AJUSTEMENT, F(2 27)= 9.10
 TERME CONSTANT = 2321.7609
 VAR COEFF ECART-TYPE T STUDENT BETA
 3 -5.5838 1.7498 -3.1911 -0.4849
 8 5.3823 1.5730 3.4216 0.5199

PALIER NUMERO 3 VARIABLE INTRODUITE 4
 ECART-TYPE RESIDUEL : 869.702
 COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE : 0.674
 TEST GLOBAL D AJUSTEMENT, F(3 26)= 7.23
 TERME CONSTANT = 2409.3416
 VAR COEFF ECART-TYPE T STUDENT BETA
 3 -5.1794 1.7226 -3.0067 -0.4498
 4 -0.6035 0.3825 -1.5777 -0.2518
 8 6.3455 1.6486 3.8491 0.6130

PALIER NUMERO 4 VARIABLE INTRODUITE 5
 ECART-TYPE RESIDUEL : 858.745
 COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE : 0.699
 TEST GLOBAL D AJUSTEMENT, F(4 25)= 5.98
 TERME CONSTANT = 1509.9674
 VAR COEFF ECART-TYPE T STUDENT BETA
 3 -4.7766 1.7293 -2.7621 -0.4148
 4 -0.6313 0.3783 -1.6687 -0.2634
 5 247.0478 191.3044 1.2914 0.1920
 8 5.9052 1.6631 3.5507 0.5704

PALIER NUMERO 5 VARIABLE INTRODUITE 1
 ECART-TYPE RESIDUEL : 840.551
 COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE : 0.728
 TEST GLOBAL D AJUSTEMENT, F(5 24)= 5.41
 TERME CONSTANT = 1708.0635
 VAR COEFF ECART-TYPE T STUDENT BETA
 1 -0.3610 0.2494 -1.4471 -0.2718
 3 -4.9474 1.6968 -2.9158 -0.4296
 4 -0.9031 0.4250 -2.1956 -0.3094
 5 370.6816 205.8215 1.8010 0.2881
 8 5.2066 1.6979 3.0664 0.5030

C O N C L U S I O N :

Le dépouillement des données hydroclimatologiques et physiographiques de 30 bassins de l'Algérie du Nord, nous a permis de constituer un échantillon exhaustif pouvant servir de base pour une étude factorielle des débits solides en zone semi-aride.

L'objectif préliminaire est relativement simple à formuler :

- mettre en évidence les principaux facteurs qui conditionnent la genèse et le caractère des écoulements solides.
- définir des indices susceptibles de traduire au mieux la variabilité et le degré d'influence de ces facteurs.

Les paramètres géomorphologiques classiques, fortement autocorrelés ne semblent pas traduire correctement les facteurs qui entrent en jeu.

Un autre problème est celui de l'échelle de temps. Une moyenne interannuelle peut masquer l'intensité et la variabilité des phénomènes hydro-pluviométriques extrêmement irréguliers en zone semi-aride.

Une approche plus fine et détaillée s'avère nécessaire. Nous nous proposons de l'entreprendre à l'échelle de l'évènement sur un bassin particulièrement intéressant (Oued ALLALAH), représentatif de la zone Tellienne, comportant des données d'observation de bonne qualité. Ce qui nous permettra de limiter le nombre de facteurs qui entrent en jeu, d'en isoler l'influence et de mettre en évidence leur variabilité.

DEUXIEME PARTIE

ETUDE D'UN CAS PARTICULIER:
LE BASSIN DE L'OUED ALLALAH A SIDI AKACHA

INTRODUCTION :

La prévision des débits solides à l'échelle de l'évènement de crue nécessite une bonne compréhension du processus précipitation-ruissellement-érosion-transport solide.

Un premier examen des données de débits moyens journaliers et des concentrations en sédiment correspondantes, observées durant la période 72/80 sur le bassin de l'oued ALLALAH à la station hydrométrique de SIDI AKACHA et l'absence évidente à première vue de corrélation entre débit et teneur en suspension nous a incité à approfondir l'étude du comportement hydrologique de ce bassin.

Des événements hydropluviométriques importants ont été enregistrés dans la région des Cotiers Algérois durant la période 72/80, ce qui nous a permis de constituer un échantillon exhaustif de crues caractéristiques.

Partant de l'analyse des hyétogrammes, hydrogrammes et turbidigrammes de 39 crues correspondant à différentes conditions de saturation du bassin, et dont les concentrations en sédiments ont été correctement observées, nous avons essayé de mieux comprendre les réactions de ce bassin aux différentes sollicitations possibles de précipitations. L'étude cartographique des conditions physiques du bassin nous a permis d'approfondir cette analyse.

Le bassin de l'oued ALLALAH à la station hydrométrique de SIDI AKACHA a été choisie pour servir de base à cette étude, en raison de ses caractéristiques physico-climatiques et socio-économiques, relativement homogènes, de sa forte érodabilité et de la qualité des mesures hydropluviométriques qui y ont été effectuées.

I.-LE BASSIN VERSANT :

Avec un taux d'érosion spécifique de $4639 \text{ T/km}^2/\text{an}$ et une turbidité moyenne annuelle de 38 g/l , le bassin versant de l'oued ALLALAH à la station de SIDI AKACHA apparaît comme un des bassins les plus vulnérables à l'érosion, de la zone Tellienne de l'Algérie septentrionale.

1.1.- Situation géographique :

S'étendant sur 295 km^2 au Sud de TENES, le bassin de l'oued ALLALAH appartient à l'ensemble des bassins "COTIERS ALGEROIS" et plus particulièrement à la zone des "COTIERS DAHRA", zone littorale relativement étroite qui s'étend sur une bande d'environ 200 km de long et 20 km de large entre l'embouchure du CHELIFF et le massif du ZACCAR.

Formant une unité géographique relativement homogène, cette chaîne de l'Atlas Tellien littoral est constituée d'une succession de massifs collinaires du crétacé et du miocène, d'altitudes modérées, dépassant rarement 1000 m , soumis à un climat méditerranéen tempéré.

Une succession d'oueds Côtiers (dont les plus importants sont les oueds KRAMIS, ALLALAH, DAMOUS et HACHEM) drainent le flanc Nord de cette chaîne, tandis que le flanc Sud alimente les affluents rive droite de l'oued CHELIFF.

1.2.- Présentation générale du bassin :

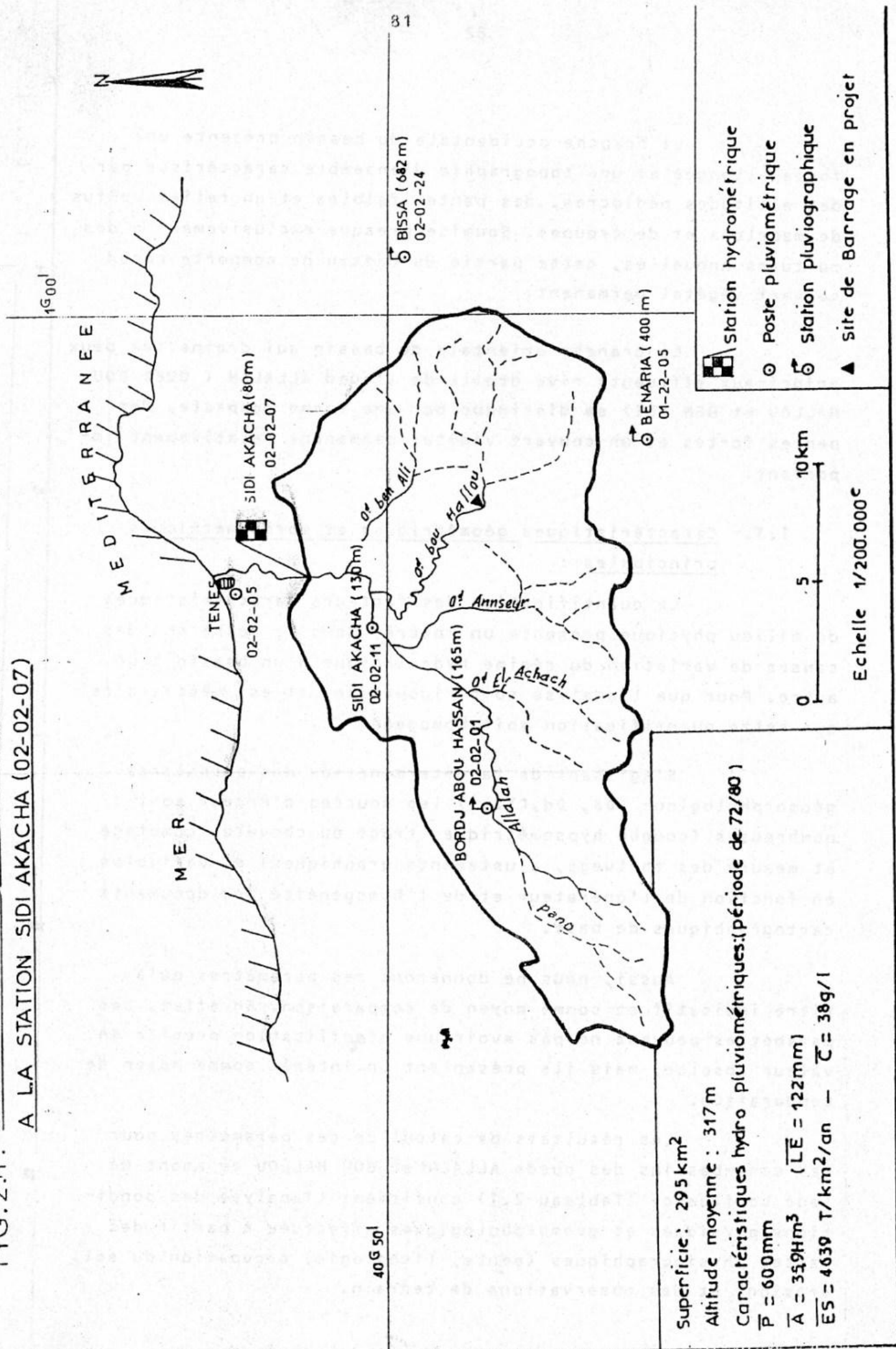
Le bassin étudié présente sensiblement une forme trapézoïdale de bases parallèles au littoral méditerranéen (fig. 2.1).

L'oued principal coule suivant une direction SUD-OUEST-NORD-EST et reçoit ses principaux affluents en rive droite.

L'examen des cartes physiographiques disponibles (lithologie, pente, couvert végétal) montre 2 zones nettement distinctes situées de part et d'autre d'une verticale passant au droit de l'exutoire.

Fig. 2.1. Bassin versant de l'oued Allalah

FIG. 2.1: BASSIN VERSANT DE L'OUED ALZALAM
A LA STATION SIDI AKACHA (02-02-07)



La branche occidentale du bassin présente une forme allongée et une topographie d'ensemble caractérisée par des altitudes médiocres, des pentes faibles et un relief confus de mamelons et de croupes. Soumise presque exclusivement à des cultures annuelles, cette partie du bassin ne comporte aucun couvert végétal permanent.

La branche orientale du bassin qui draine les deux principaux affluents rive droite de l'oued ALLALAH (OUED BOU-HALLOU et BEN ALI) se distingue par une forme compacte, des pentes fortes et un couvert végétal permanent relativement important.

1.3.- Caractéristiques géométriques et morphométriques principales :

La quantification des facteurs caractéristiques du milieu physique présente un intérêt dans la recherche des causes de variation du régime hydrologique d'un bassin à un autre. Pour que l'analyse soit rigoureuse, il est nécessaire que cette quantification soit homogène.

S'agissant de la détermination des paramètres géomorphologique (DS, Dd, CT...) les sources d'erreur sont nombreuses (courbe hypsométrique, tracé du chevelu, comptage et mesure des thalwegs, ajustements graphiques) et variables en fonction de l'opérateur et de l'homogénéité des documents cartographiques de base.

Aussi, nous ne donnerons ces paramètres qu'à titre indicatif et comme moyen de comparaison. En effet, ces paramètres peuvent ne pas avoir une signification précise en valeur absolue, mais ils présentent un intérêt comme moyen de comparaison.

Les résultats de calcul de ces paramètres pour les sous-bassins des oueds ALLALAH et BOU HALLOU en amont de leur confluence (Tableau 2.1) confirment l'analyse des conditions physiques et géomorphologiques effectuée à partir des cartes physiographiques (pente, lithologie, occupation du sol, érosion) et des observations de terrain.

Tableau 2.1 : Caractéristiques géométriques et morphométriques :

	ALLALAH A SIDI AKACHA	ALLALAH AMONT CONFLUENCE	BOU HALLOU AMONT CON- FLUENCE.
Superficie (km ²) :	S = 295	170,8	63,6
Périmètre (km) :	P = 78	70	41
Indice de compacité :	K = 1,27	1,44	1,50
Longueur du rectangle équivalent (km) :	L = 28,7	29,1	16,7
Altitude moyenne (m) :	\bar{H} = 317	289	448
" Maximale (m) :	H _{max} = 996	800	996
" minimale (m) :	H _{min} = 80	80	80
Longueur du thalweg principal (km) :	l = 35		
Dénivellée spécifique(m):	DS = 260,1	194,9	319,9
Densité de drainage (km/km ²) :	D _d = 4,74		
Coefficient de torrentialité :	CT = 44,89		

1.4.- Caractères physiques généraux :1.4.1.- La lithologie :

L'étude lithologique a été menée à partir des cartes et notices géologiques au 1/50.000 de TENES et ABOU EL HASSEN (Ex. Cavaignac).

La lithologie explique en grande partie la différence observée sur les 2 branches du bassin quant à la structure morphologique et à l'occupation du sol.

La branche occidentale du bassin est constituée essentiellement :

- Au Sud de la plaine alluviale de l'oued ALLALAH de formations argileuses helvétiques épaisses (> 200 m) profondément ravinnées par les affluents rive droite de l'oued formant des collines arrondies et dénudées.

- Au Nord de la plaine alluviale d'une étroite bande marneuse miocène dominée par des formations gréseuses miocène et éocène.

La partie orientale du bassin peut être subdivisée en 2 zones :

- Une zone amont, montagneuse, constituée de formations relativement résistantes à prédominance gréseuse de l'éocène et du crétacé supérieur (grès quartziteux Médjanien, marnes calcaires sénonien).

- Une zone aval, collinaire constituée de marnes miocène blanchâtres (carténien) ou marnes schisteuses crétacé bleuâtres (sénonien).

La répartition des différentes formations lithologiques rencontrées, calculée par planimétrie de la carte lithologique 1/200.000 (obtenue, par réduction du 1/50.000), représentée en annexe III (B.7) est résumée dans le tableau N° 2.2 suivant :

Tableau 2.2. : Répartition des formations lithologiques :

STRATIGRAPHIE	LITHOLOGIE	SUPERFICIE EN %
qt	Alluvions - terrasses	13
mm	Argiles helvétiques	29
mi	Marnes du carténien	33
mi	Grès et poudingues du carténien	6
es	Argiles et grès quartziteux Médjanien	11
cs	Marnes bleuâtres schisteuses sénonien	3
cs	Calcaires et marnes céno-manien	5

Il ressort de l'examen de ce tableau que les formations dominantes (73% de la superficie totale) sont à composantes marneuses et argileuses imperméables, très peu résistantes à l'érosion ; Ce qui explique l'importance du taux de sédiments transportés.

1.4.2.- Les pentes :

La carte des pentes représentée sur la figure 2.2 illustre une des principales caractéristiques physiques du bassin en liaison avec l'érosion. Cette carte a été élaborée en utilisant la méthode statistique par discrétisation spaciale : A partir de la carte topographique du bassin au 1/50.000 on mesure la pente en des points régulièrement répartis sur le bassin (généralement aux noeuds du carroyage LAMBERT) choisis indépendamment du relief, afin d'obtenir un échantillon suffisant et représentatif de l'ensemble du bassin. Dans le cas du bassin étudié (fig 2.2), nous avons défini pour plus de précision un carroyage comportant des mailles de 0,5 km de côté (densité : 4 points/km²).

Cette méthode a l'avantage d'être simple, objective, facile à mettre en oeuvre et automatisable.

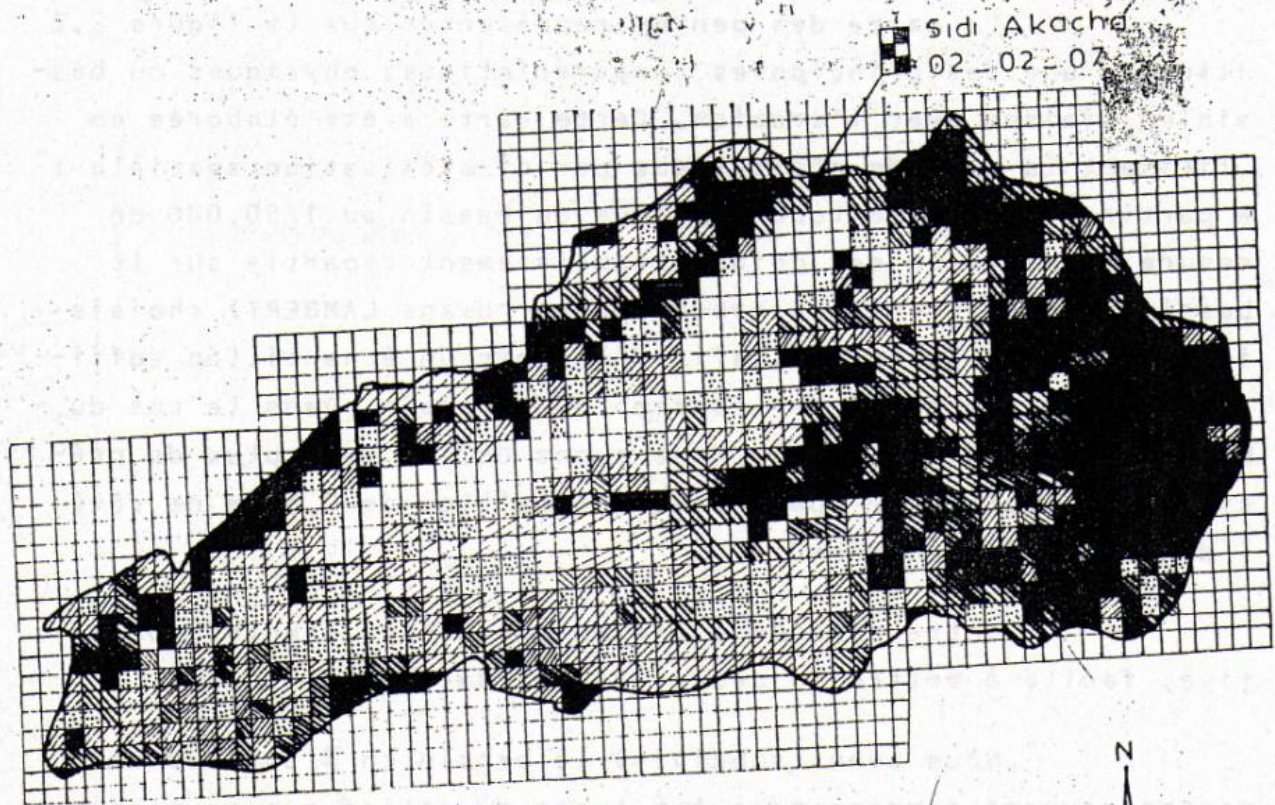
Nous avons subdivisé le bassin en 5 classes de pentes pouvant correspondre à 5 types de relief que nous résumerons dans le tableau ci-dessous en précisant les superficies occupées pour chaque classe de pente.

Tableau 2.3. : Répartition des pentes :

CLASSE DE PENTE	TYPE DE RELIEF	ZONE CONCERNEE	SUPERFICIE EN %
0 - 5°	Plaines-terrasses	ZONE ALLUVIALE	7
6° - 11°	Glacis	PIEMONTS	15
12 - 18°	Collines douces	ZONE ARGILEUSE	32
19 - 25°	Collines disséquées	ZONE MARNEUSE TRES ERODEE	18
> 25	"Montagne"	PARTIE OUEST AMONT	28






FIG.2.2 : BASSIN VERSANT DE L'OUED ALLALAH A SIDI AKACH

CARTE DES PENTES



Echelle 1/200.000

LEGENDE

	Classes de pente	type de relief
	0 à 5°	Plaines - terrasses
	6 à 11°	Glacis
	12 à 18°	Collines douces
	19 à 25°	Collines disséquées
	> 25°	" Montagne "

On voit apparaître ainsi une certaine concordance entre la structure du relief et les formations lithologiques du bassin.

En effet les fortes pentes (classe 5) apparaissent dans la zone des formations relativement résistantes à prédominance gréseuse.

Les collines disséquées et abruptes (classe 4) apparaissent sur les marnes carteniennes et contrastent par leur rigidité avec les pentes relativement douces (classe 3) des argiles helvétiques qu'on observe sur la partie Sud-Ouest du bassin.

1.4.3.- Le couvert végétal et l'occupation du sol :

La carte d'occupation du sol au 1/200.000 présentée sur la fig. 2.3 est extraite d'une étude récente d'"Inventaire des terres et forêts de l'Algérie du Nord".

Elle a été obtenue par réduction de la carte au 1/50.000 élaborée à partir de photographies aériennes et de contrôle de terrain.

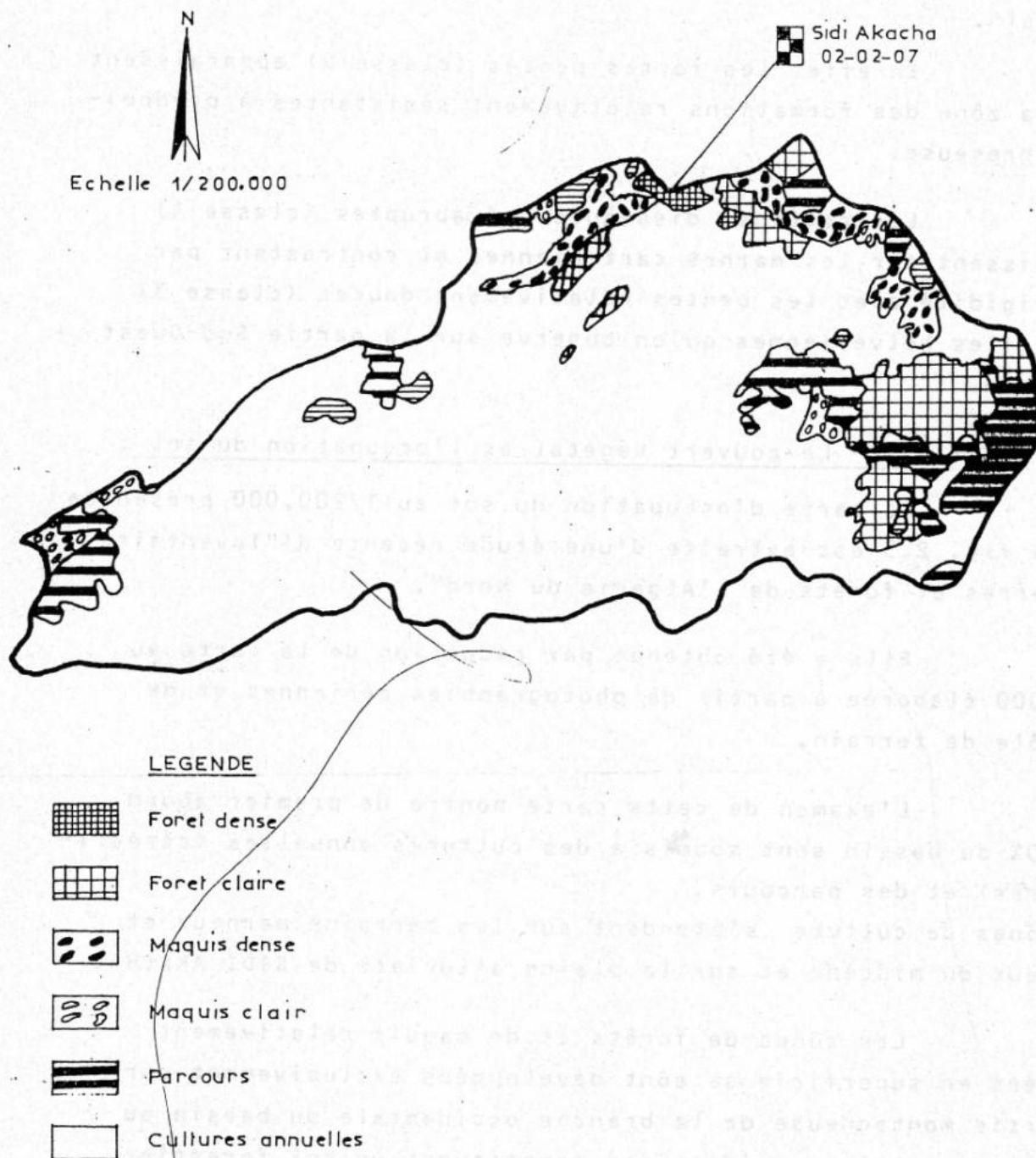
L'examen de cette carte montre de premier abord que 80% du bassin sont soumis à des cultures annuelles (céréaliculture) et des parcours.

Les zones de culture s'étendent sur les terrains marneux et argileux du miocène et sur la plaine alluviale de SIDI AKACHA.

Les zones de forêts et de maquis relativement limitées en superficie se sont développées exclusivement sur la partie montagneuse de la branche occidentale du bassin où les grès quartziteux médjaniens constituent un sol forestier par excellence.

On voit donc apparaître encore une fois une liaison étroite entre la nature des terrains et le type d'occupation du sol.

FIG.2.3: BASSIN VERSANT DE L'OUED ALLALAH
CARTE D'OCCUPATION DU SOL



1.5.- Caractéristiques climatiques :

Avec une pluviométrie moyenne annuelle de 600 mm, une température moyenne annuelle de 17 à 18° et une humidité relative de 70%, le bassin de l'oued ALLALAH appartient au climat méditerranéen littoral tempéré (étage bio-climatique semi-aride tempéré). Le régime pluviométrique est caractérisé par une sécheresse estivale élevée et un maximum pluviométrique durant les mois d'hiver (Février à Mars).

La faible densité du réseau pluviométrique et l'absence de séries longues durées ne nous a pas permis une cartographie précise des isohyètes annuelles.

L'examen de la carte pluviométrique au 1/500.000 de CHAUMONT et PAQUIN basée sur une période de référence de 50 ans montre cependant que la partie est du bassin qui reçoit entre 600 et 800 mm est relativement plus arrosée que la partie Ouest qui ne reçoit que 500 à 600 mm. Cette distinction est en concordance avec les gradients altimétriques du bassin.

1.6.- Conditions socio-économiques :

La céréaliculture et l'élevage constituent les principales branches d'activité de ce bassin. Le tableau N°2.4 ci-dessous donne les caractéristiques démographiques et l'importance du cheptel des communes de TENES et BORDJ ABOU EL HASSEN qui peuvent être considérées comme représentatives du milieu humain et économique de cette région. Ces chiffres, basés sur des données statistiques récentes montrent une pression humaine et animale extrêmement forte compte tenu des ressources du bassin.

Tableau 2.4 : Caractéristiques socio-économiques du bassin :

STATISTIQUE COMMUNE	DENSITE DE POPULATION hab/km ²	% de la popu- LATION EPARSE (1)	CHARGE ZOOTE- CHNIQUE MOY. (2)
T E N E S	144	54,0	1,02
BORDJ ABOU EL HASSEN	79	77,0	0,63

(1) Ce chiffre donne en pourcentage la population de la commune vivant en dehors du chef lieu.

(2) Charge zootechnique moyenne exprimée en équivalent ovins par hectare (rapport entre le nombre total de têtes équivalent ovins et la superficie de la commune).

1.7.- Les formes d'érosion :

Si on excepte la zone montagneuse à prédominance gréseuse sur laquelle s'est développée une couverture végétale relativement protectrice on peut dire que l'ensemble du bassin est soumis à une érosion intense où prédomine les mouvements de masse et les ravinements. La où elle apparait peu importante, elle peut être insidieuse car, la plupart du temps, elle est masquée par les labours et travaux de préparation des sols.

Sur ce bassin où les conditions naturelles sont particulièrement favorables au déclenchement du phénomène de l'érosion, la pression démographique, la surexploitation du sol et l'absence de pratiques conservatrices ont contribué à accélérer le processus érosif.

L'étude a été menée en 2 étapes :

Un premier examen rapide des photos aériennes au 1/20.000 (couverture 1972) et une première reconnaissance de terrain, nous a permis de localiser les formes prédominantes et dresser un typologie des principales formes observées.

Dans une deuxième étape, une photo interprétation systématique et une deuxième visite de terrain nous a permis de mieux préciser et localiser les différentes formes à cartographier.

Compte tenu de l'échelle des photos, seules les formes d'érosion évoluées (ravines, bad-lands) ont été facilement observées.

L'érosion en nappe existe sur la plupart des sols cultivés dès que la pente dépasse 5%. Mais ce processus n'est pas facilement discernable à l'échelle de la photo. De même les mouvements de masse sont parfois difficile à discerner du fait de la végétalisation de certains décrochements.

1.7.1.- Terminologie + légende :

La terminologie et la légende adoptées pour la cartographie des formes d'érosion sont inspirées des travaux de HEUSCH et CAPOLINI (1977, 1981).

On appelle :

1.- Erosion en nappe (ou érosion diffuse : Le décapage superficiel qui s'opère de façon insidieuse et uniforme sous l'effet de l'énergie de battance de la pluie et du ruissellement diffus.

2.- Erosion par ravinement : les différentes formes d'incisions liées à l'écoulement concentré des eaux de surface. Les griffes d'érosion apparaissent dès que les filets d'eau réussissent à se concentrer et à inciser le sol.

On distingue :

a- Les ravines individualisées, qui sont d'anciens rills qui ont réussi à se fixer et à s'approfondir. Elles sont individuelles et sans ramification.

b- Les ravines hiérarchisées, lorsqu'elles comportent de nombreuses ramifications.

c- Les bad-lands, stade ultime de la dissection d'un versant par entailles très ramifiées. La densité des ravins est telle que ceux-ci sont contigus et que la surface topographique initiale est complètement détruite. Les ravins sont séparés les uns des autres par des arêtes rives.

3.- Erosion par mouvement de masse :

On distingue dans cette catégorie :

a- Les mouvements généralisés des versants :

la solifluxion lente s'observe sur certains versants tapissés d'un manteau de formations superficielles meubles dont la cohésion avec la substration diminue du fait des eaux de percolation. Celui-ci se met à fluer vers le bas du versant.

b- Les mouvements brutaux ponctuels en cas de fortes pentes :

- mouvement rotationnels (coup de cuillère, loupe de glissement, foirage).
- coulées boueuses.

4.- Erosion par reprise des matériaux :

- Les sapements de berge dans les terrasses anciennes et récentes.
- Les sapements de pied de versant.

1.7.2.- Vue d'ensemble sur l'érosion du bassin de l'oued ALLALAH (fig. 2.4) :

1.7.2.1.- La branche Sud-Ouest du bassin est essentiellement instable.

Les argiles miocène qui dominent dans cette zone constituent en effet le terrain de prédilection des mouvements de masse.

Dans ce contexte morphogénétique très caractéristique, modelé par la solifluxion et les glissements de terrain, de nombreux foirages, coups de cuillères, coulées boueuses ont pu être décelés sur photo et cartographiées. Les plus remarquables sont visibles aux environs du KERBA et du CHAREB ER RIH sur la Route National 19 ECHLEF-TENES (planche N°2).

Dans cette zone à vocation céréalière, les vertisols qui recouvrent le substratum argileux sont soumis à des labours profonds et semblent se régénérer rapidement.

En favorisant l'infiltration le labour provoque dans ces terres peu perméables des glissements de terrain, en particulier lorsque le substratum est plus imperméable que le sol.

Il peut se développer en outre des entailles linéaires d'origine anthropiques causés essentiellement par des exutoires de fossés de route (planche N° 3).

1.7.2.2.- Plus en aval, les terrains marneux du cartenien sont soumis quant à eux à une érosion intense par entailles linéaires : griffes, ravines individualisées, ravines hiérarchisées, Bad-Lands se succèdent et se juxtaposent tout au long des versants qui alimentent les oueds BOU HALLOU et BEN ALI (planches N° 1 et 4).

Cette zone située à proximité de l'exutoire du bassin constitue probablement la source principale des sédiments qui transitent à la station de SIDI AKACHA. L'examen des turbidigrammes des crues que nous aborderons au chapitre VI, présentant des pointes de 250 à 300 g/l, dès le démarrage du ruissellement (crues N°1 et 6 par exemple) confirme cette hypothèse.

Des entailles linéaires sont visibles en outre tout au long de la route ABOU EL HASSEN-SIDI AKACHA qui longe

L'étroite bordure NORD-OUEST du bassin qui domine la plaine alluviale.

La limite entre les grès bien protégés par un couvert végétal relativement dense et les marnes extrêmement ravinées est très nette dans cette zone.

L'alternance de couches tendres (marnes) et de bancs plus durs (grès) détermine ici une érosion spectaculaire.

1.7.2.3.- L'érosion par sapement de berge est particulièrement développée dans le tronçon aval de l'oued BOU HALLOU. Cet oued qui prend sa source dans la zone montagnieuse et bien protégée des grès quartziteux, aborde sa plaine alluviale avec un régime torrentiel et un potentiel érosif qu'il dépense en sapant ses berges.

L'érosion par sapement de berges et de versants existe aussi dans la zone des mouvements de masse généralisés mais elle se manifeste de façon moins spectaculaire car les sols transportés par les eaux sont rapidement remplacés par le processus lent, insidieux mais irréversible qui^{se} développe dans cette région (solufluxion, glissement, coulées boueuses)


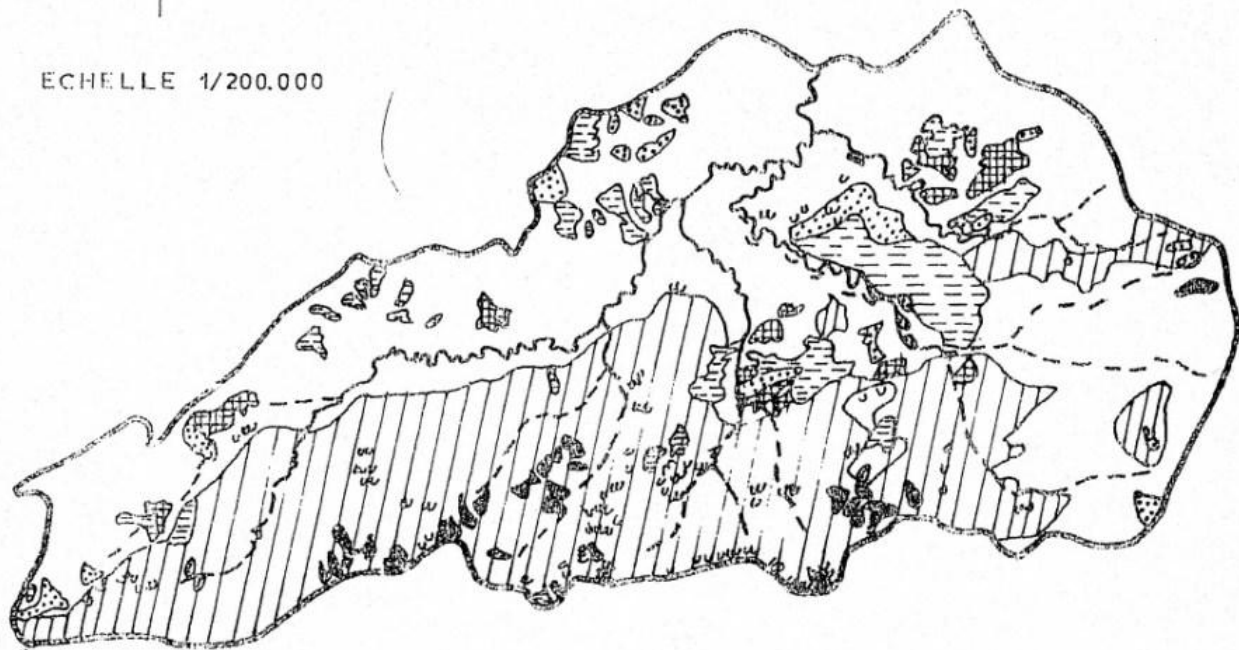


Fig. 2. 4: DASSIN VERSANT DE L'OUED ALLALAH CARTE DES FORMES D'EROSION






ECHELLE 1/200.000






LEGENDE


I. Ravinements

-  Ravines individualisées
-  Ravines hiérarchisées
-  Bad-lands

II. Mouvements de masse

-  Grandes zones instables (mouvements de masse, solifluxion)
-  Glissement de terrain
-  Foinages, coups de cuillère, zone de dépôt des ravines

III. Zones de reprise de matériaux par les oueds

-  Sapelements de berges au pied de versant

II.- REGIME HYDROLOGIQUE DE L'OUED ET RESSOURCES EN EAU DU BASSIN :

2.1.- Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique de l'oued (représenté sur la fig 2.1) est constitué d'une artère principale : l'oued ALLALAH d'orientation SUD-OUEST - NORD-EST qui draine la partie occidentale du bassin.

Il reçoit en rive droite une série de petits affluents, les plus importants étant les oueds BOU HALLOU et BEN ALI qui drainent la partie orientale du bassin.

2.2.- Le régime hydrologique de l'oued ALLALAH :

La conjugaison des crues des trois principaux affluents lors de précipitations généralisées sur le bassin se traduit par des crues violentes et brutales provoquant des inondations catastrophiques dans la ville de TENES et ^{les} villages voisins.

L'importance des dégâts causés par ces inondations ont amené dès 1959 l'ingénieur d'arrondissement à solliciter le concours du Service Hydrologique Central pour l'étude du comportement hydrologique de ce bassin en vue de la mise en place d'un système de prévision et d'alerte de crue.

Dans une correspondance du 17 Janvier 1961 l'ingénieur de subdivision signale la destruction dans des conditions surprenantes de la station hydrométrique de TENES par suite de la crue du 13 au 15 Janvier 1961 qui a provoquée l'effondrement du talus amont de la culée du Pont de la RN 11.

Aucune trace de cette station n'a pu être retrouvée, bien que des recherches aient été entreprises aussitôt.

Le caractère irrégulier de cet oued, lié à la constitution lithologique de son bassin et à son caractère imperméable est illustré par les figures 2.5 et 2.6 qui représentent en coordonnées semi-logarithmiques les hydrogrammes

annuels des débits moyens journaliers observés durant les années hydrologiques 72/73 et 73/74 :

Les valeurs extrêmes observées durant l'année hydrologique 73/74 sont significatives :

- $Q_{J.min} = 30 \text{ l/s}$ (durant la première quinzaine du mois de Septembre 73).

- $Q_{J.max} = 170 \text{ m}^3/\text{s}$ (le 30 Mars 74).

Pour les besoins de notre analyse, nous avons procédé à la séparation des écoulements annuels en écoulements de base et écoulements de crue.

Malgré la difficulté de sa mise en oeuvre, cette opération, maintenant classique, présente toujours beaucoup d'intérêt pour de multiples applications et notamment pour la recherche de relations entre les écoulements et les caractéristiques physiques des bassins. Il est bien connu en effet que ces 2 catégories d'écoulement procèdent de mécanismes différents en liaison avec les différentes caractéristiques physiques d'un bassin.

Dans notre cas particulier, cette séparation se limitera à démontrer la contribution relative des crues à la formation des apports annuels de l'oued ALLALAH.

La mise en oeuvre de cette méthode nécessite la détermination d'une loi de tarissement moyenne. Nous retiendrons pour représenter le tarissement, une expression de la forme $Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$.

Les hypothèses de base et la technique opérationnelle pour la détermination de la courbe de tarissement et la séparation des écoulements sont données en détail par J.M. MASSON (1977).

L'application systématique de cette méthode aux hydrogrammes annuels observés à la station de SIDI AKACHA sur

la période 72/78 a donné les résultats qui sont consignés dans le tableau 5.

Le même calcul a été effectué à titre de comparaison aux données de 6 autres bassins similaires des "Cotiers Algérois".

On constate que :

1.- La valeur importante du coefficient de tarissement moyen confirme l'inexistence d'une réserve régulatrice importante de la nappe du bassin.

2.- La valeur moyenne du rapport ECOULEMENT DE CRUE/ECOULEMENT DE BASE (C/B) (qui atteint le chiffre record de 8,64) démontre la prépondérance des écoulements de crues qui contribuent à 88% des écoulements annuels sur les écoulements de base. Ces résultats confirment le caractère imperméable du bassin.

2.3.- Les ressources en eau du bassin et les possibilités de leur aménagement :

Lorsqu'on s'intéresse aux schémas possibles d'aménagement des ressources en eau d'un bassin, on voit de nouveau apparaître l'intérêt de séparer les écoulements, en écoulement de base et écoulement de crue :

Au premier type d'écoulement correspond des travaux de petite hydraulique (prise au fil de l'eau), tandis que la mobilisation du second type d'écoulement nécessite de gros ouvrages de régulation (barrages) moyennant l'existence de sites aménageables.

2.3.1.- Les ressources superficielles :

Comme il a été démontré au point précédent, les apports de l'oued ALLALAH sont essentiellement des apports de crues. Les réserves régulatrices de la nappe alluviale, ainsi

que ^{les} aquifères des reliefs sont très limités. Les apports de base ne contribuent en moyenne que pour 12% des apports totaux. Les possibilités d'aménagement des ressources superficielles restent cependant très limitées :

Le seul site reconnu aménageable se situe sur l'oued BOU HALLOU en amont de la plaine, dans les grès et poudingues du miocène inférieur (cartenien) où une gorge profonde a pu être creusée.

Les apports moyens de l'oued BOU HALLOU à ce site qui contrôle un bassin de 47 km^2 sont estimés à 6 Millions de mètres cubes (17% des apports à SIDI AKACHA).

2.3.2.- Les ressources souterraines :

La zone alluviale de l'oued ALLALAH est assez mal connue. On peut cependant affirmer que son extension est réduite et sa perméabilité assez faible. L'infiltration moyenne est estimée à $6,4 \text{ Millions de m}^3/\text{an}$. Les potentialités de la nappe sont évaluées à $5,1 \text{ Millions de mètres cubes}$ si on estime à 20% les écoulements souterrains vers la mer. Il est difficile d'exploiter par des puits de forage plus de la moitié des ressources. On estime ainsi les potentialités exploitables à $2,5 \text{ Hm}^3/\text{an}$.

En dehors de cette nappe alluviale, les aquifères sont compartimentés, et en général, situés sur des reliefs d'où ils donnent naissance à des sources et aux débits pérennes de l'oued.

Les reconnaissances sur le terrain en étiage ont permis de constater que le meilleur soutien aux débits d'étiage est fourni par le bassin versant de l'oued BOU HALLOU en amont de sa plaine alluviale (aquifères principaux constitués essentiellement dans les grès quartziteux du médjanien et les grès et poudingues du cartenien).

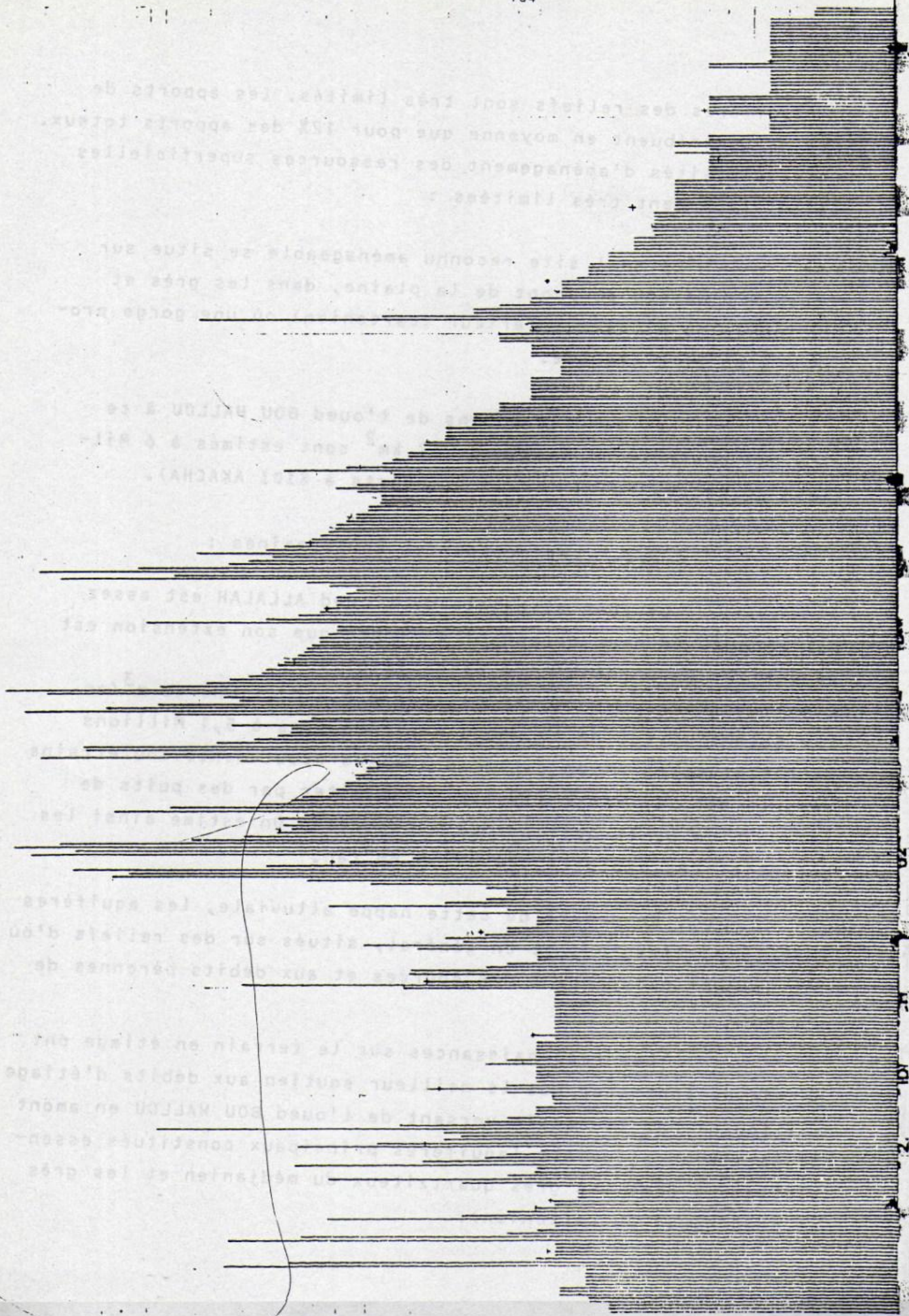
72-73

HYDROGRAMME ANNUEL

(02-02-07)

FIG. 2.6 : SIDI AKACHA

M³/s



1000
 900
 800
 700
 600
 500
 400
 300
 200
 100
 0

1000
 900
 800
 700
 600
 500
 400
 300
 200
 100
 0

1000
 900
 800
 700
 600
 500
 400
 300
 200
 100
 0

1000
 900
 800
 700
 600
 500
 400
 300
 200
 100
 0

1000
 900
 800
 700
 600
 500
 400
 300
 200
 100
 0

1000
 900
 800
 700
 600
 500
 400
 300
 200
 100
 0

1000
 900
 800
 700
 600
 500
 400
 300
 200
 100
 0

Tableau-2.5.-: CALCUL DES COEFFICIENTS DE TARISSEMENT ET DES RAPPORTS ECOULEMENT DE CRUE/ ECOULEMENT DE BASE DE 7 STATIONS DU COTIERS ALGEROIS SUR LA PERIODE 72/80.

OUED	STATION	CODE	SUPER- FICIE	P (72/78)	COEFFICIENT DE TARISSEMENT ET C/B							
					72/73	73/74	74/75	75/76	76/77	77/78	72/78	
ALLALAH	SIDI AKACHA	02-02-07	295	599	α	.0480	.0435	.0640	.0512	0.490	0.768	.0554
					C/B	3.77	12.6	4.43	19.8	3.43	7.8	8.64
					α	.0281	.0283	.0265	.0221	.0339	.0291	.0280
EBDA	ARIB EBDA	01-18-01	270	737	C/B	2.33	3.10	1.04	2.22	1.75	2.11	2.09
					α	.0411	.0305	.0435	.0419	.0395		.0393
					C/B	2.08	2.15	1.11	1.28	1.03	1.46	1.52
HACHEM	BORDJ GHOBIRINI	02-03-01	215	631	α	.0295	.0397	.0379	.0230	.0334		.0325
					C/B	2.86	3.37	1.60	1.55	1.06	1.57	2.00
					α	.0410	.0358	.0415	.0419			.0401
BOU ROUMI	TARZOUULT	02-10-02	215	652	C/B	2.47	3.60	1.74	2.49	1.64	3.66	2.60
					α	.0295	.0280	.0270	.0237		.0307	.0273
					C/B	1.72	3.26	1.18	2.17	1.37	1.85	1.93
DJER	EL AFFROUH	02-10-07	395	582	α	.0291	.0262	.0243	.0138	.0272		.0241
					C/B	1.29	3.39	0.50	0.99	0.52	0.84	1.09
					α	.0410	.0358	.0415	.0419			.0401
CHIFFA	AMONT DES GORGES.	01-11-26	316	871	C/B	2.47	3.60	1.74	2.49	1.64	3.66	2.60
					α	.0295	.0280	.0270	.0237		.0307	.0273
					C/B	1.72	3.26	1.18	2.17	1.37	1.85	1.93
EL HARRACH	HAMMAN MELOUANE	02-13-01	387	830	α	.0291	.0262	.0243	.0138	.0272		.0241
					C/B	1.29	3.39	0.50	0.99	0.52	0.84	1.09
					α	.0410	.0358	.0415	.0419			.0401

La deuxième a fonctionné de façon très sporadique de Juin 61 à Mai 67.

La troisième a été détruite par la crue du 13 au 15 Janvier 1961. Remise en service en Juin 61 elle a été définitivement arrêtée en Décembre 1965.

L'absence d'originaux limnigraphiques et de jaugeages, la mauvaise qualité des mesures et la présence de nombreuses lacunes n'ont pas permis une exploitation correcte de ces premières années de mesure.

3.2.- Le réseau actuel : LA STATION DE SIDI AKACHA
(02-02-07) - ($x = 375,8$; $y = 354,30$; $z = 90$ m).

Lors de la restructuration du réseau hydrométrique du bassin entreprise en 1971, il a été décidé, dans un souci de rationalisation de maintenir une seule station sur le bassin au site de SIDI AKACHA (ex MONTENOTE) en l'équipant correctement de façon à ce qu'elle puisse répondre d'une part aux besoins de la prévision des crues et la protection contre les inondations, d'autre part à celui de l'alimentation en eau de la ville de TENES et du périmètre de SIDI AKACHA.

La présente étude a cependant mis en évidence l'insuffisance du réseau ainsi conçu. En effet, une station hydrométrique sur l'oued BOU HALLOU aurait présenté beaucoup d'intérêt pour la connaissance du régime hydrologique de la branche Est du bassin dont les caractéristiques physiques et hydrologiques sont très différentes de la partie Ouest et dont la contribution à la formation des crues est certainement très importante.

Le site de l'ancienne station MONTENOTE située au Pont de la RN 19 à la sortie du village ayant été jugé insuffisant, la station a été déplacée à 2 km en aval de l'entrée

III.- LE RESEAU D'OBSERVATION ET DE MESURE :

3.1.- Le réseau hydrométrique ancien :

Le réseau hydrométrique ancien de ce bassin a été initialement conçu dans un objectif de contrôle des crues.

Le dispositif d'alerte devant être basé sur des observations faites suffisamment en amont de la zone à protéger, 3 stations hydrométriques ont été mises en service en Septembre 1960 :

Station Amont : BORDJ ABOU EL HASSEN (ex CAVAINAC - Code : 02-02-01) - ($x = 265,3$; $y = 346,8$) : contrôle une superficie de 60 km^2 , située à 25 km de la zone à protéger pouvant permettre une prévision de 3 à 4 heures d'échéance.

Station intermédiaire : SIDI AKACHA (ex MONTENOTE - Code : 02-02-12) - ($x = 375,7$; $y = 352,9$) : contrôle la quasi totalité du bassin à 8 km de la zone à protéger devant permettre une prévision exacte de l'importance des crues avec un préavis de 1^H. Cette station devait en outre fournir les données pour l'étude de la vitesse de propagation des intumescences de crues et leur amortissement, ainsi que l'étude des contributions relatives des parties EST et OUEST du bassin à la formation des crues.

Station terminale : TENES (Code 02-02-05) - ($x = 375,8$; $y = 357,3$) - immédiatement en amont de la zone à protéger. L'enregistrement des hauteurs d'eau à cette station devant permettre d'établir des corrélations entre les hauteurs observées avec celles des stations amont et intermédiaire.

Ce réseau hydrométrique n'a malheureusement fonctionné que durant une période limitée et dans des conditions très mauvaises.

La première station a été abandonnée en Juin 1962.

des gorges de TENES, où la présence d'un seuil rocheux assure une bonne stabilité et un excellent contrôle hydrologique, tandis que le retrécissement du lit au niveau des gorges améliore la sensibilité de la station et facilite son étalonnage.

Les 7 premiers éléments d'échelles ont été implantés en Novembre 1971 et un limnigraphe pneumatique du type "TELEMNIP" d'amplitude 7 m a été installé en Mai 1972.

Un observateur permanent assure la lecture quotidienne des côtes à l'échelle, contrôle le bon fonctionnement du limnigraphe et effectue les prélèvements d'échantillons pour analyse.

Les jaugeages de crues sont effectués à partir d'un vieux Pont dit "PONT DU MOULIN" à 2 passes situé à 200 m en Amont de la station.

Pour les besoins de l'étalonnage de la station, il a été procédé durant la période 1972/80 à 189 jaugeages sur une amplitude de 0,04 à 2,50 m (dont 13 supérieurs à $10 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un débit maximal jaugé de $101 \text{ m}^3/\text{s}$).

La côte maximale atteinte durant cette période ayant été de 6,20 m, lors de la crue du 2 Mars 1979 il a fallu procéder à une extrapolation de la courbe d'étalonnage à partir des lois de variation de la section mouillée et de la vitesse moyenne.

La mesure des transports solides en suspension est effectuée par prélèvement systématique d'échantillons de 500 cc en surface et analyse pondérale au niveau du laboratoire local après décantation, filtrage et étuvage.

La turbulence des écoulements en crue au site de la station permettant un bon brassage de l'écoulement et assurant une bonne représentativité de l'échantillon prélevé en surface, l'accent a été mis sur la fréquence élevée des prélèvements effectués durant les crues afin de garantir un tracé

aussi précis que possible des turbidigrammes ; Ainsi, 3550 échantillons ont été prélevés et analysés durant la période 72/80.

3.3.- Le réseau pluviométrique :

Le réseau pluviométrique existant à l'intérieur du bassin est relativement récent et se limite à 2 stations dont l'une est équipée d'un pluviographe.

STATION	EQUIPEMENT	CODE	ALTITUDE (m)	DATE DE MISE EN SERVICE.
BORDJ ABOU ELHASSEN	PV + PG	02-02-01	165	AVRIL 1973
SIDI AKACHA	PV	02-02-11	130	JANVIER 1971

Pour les besoins de l'étude des relations précipitation-ruisselement, nous avons en outre utilisé les données d'enregistrement du poste pluviographique de BENARIA (01-22-05) situé à 400 m d'altitude à la limite SUD du bassin, mis en service en Avril 1973 et du poste de BISSA (02-02-24) situé à 682m à la limite EST du bassin et mis en service en Septembre 1978.

Pour les besoins de l'étude statistique des précipitations journalières du bassin, nous avons utilisé les données de 3 postes pluviométriques longue durée de la région.

STATION	EQUIPEMENT	CODE	ALTITUDE (m)	DUREE DE FONCTIONNEMENT (années)
TENES	PV	02-02-05	5	36
SIDI ALI	PV	02-01-07	320	41
BRAHIM	PV	02-01-12	60	33

IV.- ETUDE STATISTIQUE DES PRECIPITATIONS :

Cette étude est basée sur les données pluviométriques journalières des 3 postes longue durée de la région par ajustement d'une loi de GUMBEL.

La figure 2.7 illustre les résultats de cette analyse.

L'ajustement graphique d'une droite de distribution moyenne et le calcul des intervalles de confiance à 80% montrent que ces 3 postes appartiennent à une région climatique homogène et permettent une estimation correcte des précipitations journalières des différentes fréquences sur le bassin :

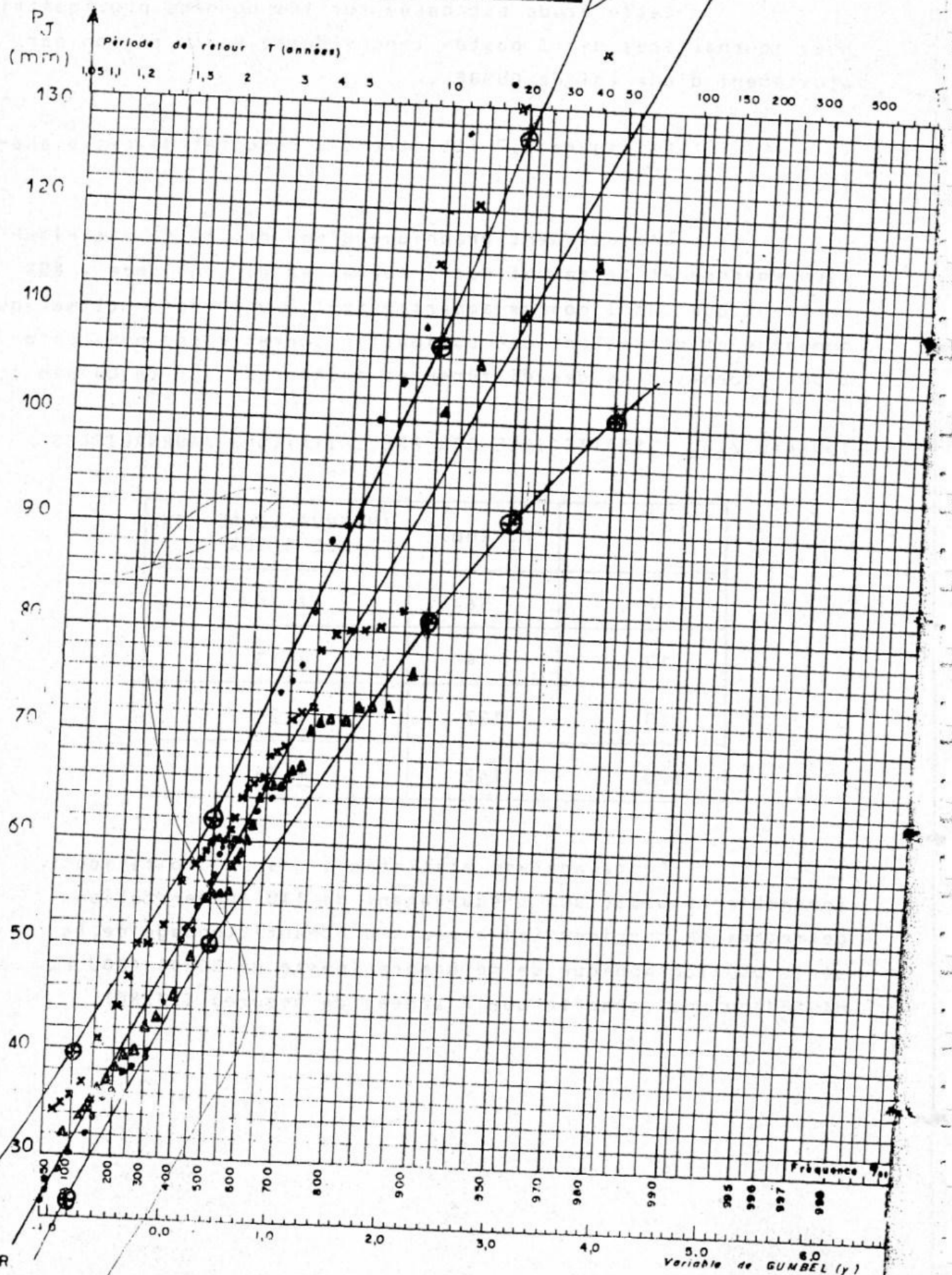
Tableau 2.6. : STATISTIQUE DES PRECIPITATIONS JOURNALIERES :

T	P _j (mm)	INTERVALLE DE CONFIANCE à 80%
2	56	± 6
10	94	± 13
50	127	± 26
100	142	± 35

Cette analyse statistique des précipitations journalières basée sur l'équivalent de 110 année-station permettra de corriger les erreurs d'échantillonnage de la série pluviographique de référence (poste de BORDJ ABOU EL HASSEN) qui ne comporte que 7 années de mesures (73/80).

FIG.2.7:statistique des précipitations
Journalières

- x TENES _02 _02 _05 (5 m _ 36ans)
- BRAHIM _02 _01 _12 (60m _ 33ans)
- Δ SIDI ALI _02 _01 _07 (320m 41ans)



En effet la statistique des précipitations de courte durée a été effectuée à partir des enregistrements du poste pluviographique de BORDJ ABOU EL HASSEN (02-02-01) par ajustement d'une loi de GUMBEL.

La figure 2.8 illustre cette analyse et permet d'établir la loi intensité-durée-fréquence du bassin qui sera de la forme :

$$\frac{P_t (F)}{P_j (F)} = 0.35 t^{0.40}$$

A partir de cette loi on détermine les précipitations de courtes durées pour différentes fréquences en se basant sur les précipitations journalières définies précédemment.

Tableau 2.7.: STATISTIQUE DES PRECIPITATIONS DE COURTE DUREE:

T \ t (h)	0,25	0,5	1	2	6	12	24	P ₅
2	11,3	14,9	19,6	25,9	40,1	53,0	69,9	58,0
10	18,9	24,9	32,9	43,4	67,4	88,9	117,3	94,0
50	25,5	33,7	44,5	58,7	91,0	120,1	158,5	127,0
100	28,6	37,7	49,7	65,6	101,8	134,3	177,2	142,0

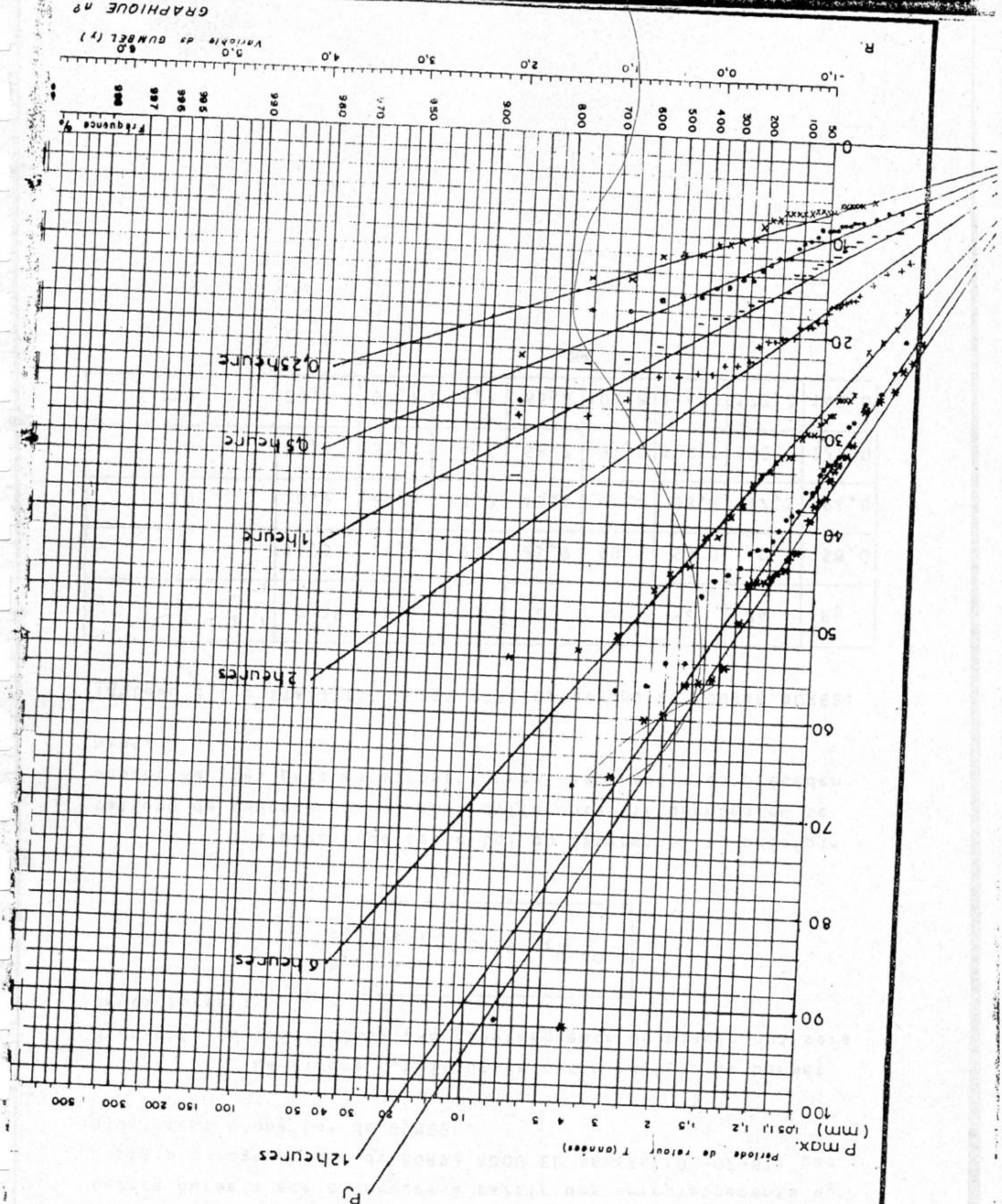
ANALYSE STATISTIQUE DES PRÉCIPITATIONS DE COURTE DURÉE

POSTE DE BORDJ ABOU EL HASSAN (02-02-01)
1/09/73 au 31/08/80 (7ans)

*

$$\frac{P_T}{P_J} = 0,351 \quad 0,4$$

- * 8h
- 12h
- x 6h
- + 2h
- 1h
- 0,1
- x 0,2



V.- CONSTITUTION D'UN FICHER DE CRUES :

5.1.- Critère de sélection des crues :

Pour les besoins de cette étude, nous avons procédé au dépouillement, tracé et calcul de toutes les crues, de pointe supérieure à $20 \text{ m}^3/\text{s}$, observées durant la période 1972/73 - 1979/80 (8 années hydrologiques).

Le débit de pointe de crue nous semble être une variable objective plus précise que le volume ruisselé dont le calcul comporte généralement une part d'imprécision, liée à l'imprécision de la séparation des différents types d'écoulement.

L'échantillon ainsi constitué, comportait initialement 74 valeurs.

Pour l'étude des relations pluie-ruissellement, nous avons dû renoncer aux 14 crues de l'année 1972/73, pour laquelle il n'existait pas encore d'observations pluviographiques sur le bassin. 60 crues, constituant un échantillon exhaustif ont pu être utilisées pour les besoins de cette analyse.

Un listing de toutes les crues supérieures à $20 \text{ m}^3/\text{s}$, observées du 01/09/73 au 31/08/80 est donné au tableau 2.8.*

Pour l'étude des relations ruissellement-turbidité nous avons dû écarter 26 crues qui ne comportaient pas d'observations correctes en turbidité (prélèvements insuffisants ou mal répartis).

L'analyse statistique des 34 crues retenues après cette sélection montre cependant que ce nouvel échantillon sur lequel on peut ajuster une droite sur papier de GUMBEL peut être considéré comme représentatif de l'échantillon exhaustif initial: en effet tout se passe comme si les individus de l'échantillon final ont été prélevés au hasard de l'échantillon initial.

* Un échantillon annexe constitué de 5 crues particulièrement démonstratives, bien que ne répondant pas au critère de sélection ($Q_p > 20 \text{ m}^3/\text{s}$) a été ajouté à l'échantillon initial.

OBSERVÉES A SIDI AKACHA DU 1/09/73 AU 31/08/80

N°	DATE	P _{AH}	P _{BEN}	L _R	Q _p		N°	DATE	P _{AH}	P _{BEN}	L _R	Q
1	01/10/73	34,0	-	4,1	114,0		31	01/09/75	10,0	28,5	3,6	132,0
2	01/10/73	37,0	4,0	2,7	41,9		32	14/09/76	7,0	6,0	1,9	6
3	05/12/73	66,0	41,0	5,4	41,4		33	06/11/75	7,0	28,0	2,9	36,2
4	31/12/73	35,0	-	11,1	65,9	*	34	26/12/76	9,5	31,5	4,3	4
5	19/02/74	24,5	17,5	2,6	35,9	*	35	08/01/77	12,0	19,5	2,1	38,0
6	22/02/74	15,0	6,0	5,1	31,7	*	36	24/01/77	32,5	27,5	4,9	78
7	24/02/74	2,0	2,5	1,8	52,7	*	37	24/11/77	55,0	-	5,7	43,0
8	25/02/74	9,5	7,0	3,9	58,9	*	38	20/01/78	12,0	18,0	1,9	26
9	29/02/74	39,0	53,0	6,8	55,4	*	39	31/01/78	28,5	14,0	1,5	20,5
10	20-31/3/74	119,0	92,0	61,0	485,0	*	40	12/04/78	53,0	8,0	3,8	38,
11	03/04/74	28,0	27,0	9,7	66,5	*	41	01/10/78	-	27,0	0,8	22,1
12	04/04/74	-	4,5	2,9	35,4	*	42	02/10/78	-	37,5	4,6	33,
13	13/04/74	29,5	34,0	8,1	71,1	*	43	17/10/78	31,0	30,0	1,2	56,9
14	16/04/74	6,3	18,0	3,2	44,6	*	44	12-20/10/78	53,0	-	14,7	180,
15	27/04/74	10,5	12,5	2,5	32,1		45	26/11/78	50,6	20,5	3,3	49,2
16	30/04/74	21,0	20,0	6,3	50,1		46	01/12/78	-	5,0	1,4	40,7
17	13/10/74	33,5	21,0	1,6	23,8		47	19/12/78	-	35,5	3,3	43,6
18	19/10/74	21,5	22,0	4,1	59,4		48	22/12/78	-	7,0	1,3	31,3
19	06/03/75	46,0	41,5	5,1	37,5	*	49	16/02/79	42,0	34,0	8,1	98,0
20	10/03/75	24,0	11,0	2,5	29,7	*	50	24/02/79	-	56,0	27,6	323,0
21	04/11/75	34,0	25,0	3,5	50,5	*	51	27/02/79	-	59,0	30,2	308,0
22	05/11/75	12,0	12,0	1,8	2,7		52	04/03/79	-	55,0	18,3	183,2
23	07/11/75	8,5	25,0	3,2	47,0	*	53	07/03/79	-	89,0	42,8	594,0
24	7/11/75	39,5	-	3,5	42,5	*	54	15/04/79	27,0	26,0	3,6	33,1
25	20/12/75	41,0	44,0	12,0	128,0		55	10/12/79	36,5	2,5	2,3	56,9
26	02/02/76	25,0	22,0	7,6	231,0		56	21/12/79	56,0	37,0	10,9	232,0
27	05/02/76	36,0	30,0	10,0	84,5		57	15/01/80	23,0	43,0	23,2	262,0
28	07/02/76	108,0	100,0	57,2	507,0	*	58	16/01/80	8,0	5,0	3,0	36,2
29	10/02/76	14,0	12,0	4,0	22,4		59	06/02/80	57,5	73,5	18,0	289,0
30	10/04/76	43,5	11,0	1,0	32,1		60	08/03/80	7,0	17,0	3,5	79,7

P_{AH} = Pluie au poste de BORDJ ABOU EL HASSEN (mm)

P_{BEN} = " " de BENARTIA (mm)

* = Crue sélectionnée pour l'étude précipitation-ruissellement-transport solide
 - = Pas d'observation.

L_R = Lane ruisselée (mm)

Q_p = Débit de pointe (m³/s).

5.2.- Calcul des caractéristiques principales des évènements averse-crue-transport solide :

Ces caractéristiques sont résumées dans le tableau 2.10.

5.2.1.- Les précipitations :

Les averses génératrices ont été observées correctement pour la majorité des crues sélectionnées aux postes pluviographiques de BORDJ ABOU EL HASSEN et BENARIA.

Les enregistrements de ces 2 postes ont été dépouillés au pas de temps de 30 mn. Les hyétogrammes correspondants présentent des formes similaires (corps d'averse et intensités maximales concomitantes), les intensités maximales étant généralement légèrement supérieures au poste de BORDJ ABOU EL HASSEN. Cette bonne corrélation s'explique par leur position géographique suivant une direction NORD-OUEST/SUD-EST qui coïncide avec la direction des vents pluvieux dominants.

L'existence de ces 2 postes pluviographiques a permis de faire correspondre un hyétogramme à chacune des crues sélectionnées et de calculer les principales caractéristiques des averses génératrices (total précipité, intensité maximale en 30 mn, énergie cinétique et agressivité des averses, capacité d'infiltration apparente moyenne...).

Ces paramètres ont été calculés en se basant sur les enregistrements du poste de BORDJ ABOU EL HASSEN. Le poste de BENARIA a toutefois été utilisé pour les 4 crues de Décembre 78, de Février et Mars 79 (crues N°26, 28, 29 et 30, annexe II) pour lequel le poste de BORDJ ABOU HASSEN n'a pas fonctionné.

Théoriquement pour un évènement averse-crue donné, la lame précipitée à prendre en compte doit être calculée à partir du hyétogramme d'averse en partant du temps de démarrage du ruissellement qui correspond au début de l'averse efficace.

En pratique nous observons pour la plupart des crues, et plus particulièrement pour les crues d'automne un décalage d'environ 2^h entre le début de l'averse efficace et le démarrage du ruissellement.

Ce décalage peut parfois être dû simplement à un déphasage entre les systèmes d'horlogerie des appareils enregistreurs.

Il peut aussi arriver que certaines perturbations soient enregistrées aux postes pluviographiques situés en amont du bassin avant de toucher la partie aval qui doit normalement contribuer au démarrage du ruissellement.

Aussi, nous avons systématiquement tenu compte dans le calcul de la lame précipitée, de la tranche précipitée durant les 3 ou 4 premières heures qui précèdent la pluie efficace.

S'agissant d'érosion, une averse peut être caractérisée selon WISCHMEIER par son énergie cinétique :

$$\sum E_c = \sum (8.73 \log I + 11.9) \Delta P$$

et son agressivité

$$R = \frac{\sum E_c \cdot I_{30}}{685}$$

Ces indices ont été calculés sur les 34 crues sélectionnées.

5.2.2.- L'état de saturation du bassin :

L'indice de saturation du bassin a été estimé à l'aide de 3 paramètres :

1.- Le débit de base initial Q_0 , avant la montée de la crue qui traduit généralement bien l'état de saturation du bassin.

2.- La capacité apparente moyenne d'absorption définie comme étant une constante, ce qui constitue une approximation suffisante pour les besoins de ce calcul. Nous l'avons

déterminée en prenant sur le hyétogramme à partir des plus fortes intensités, la fraction de la pluie ayant engendré le ruissellement.

3.- L'indice des précipitations antécédentes, défini par la formule :

$$I P A = \sum_{i=1}^6 K^i P_{j-i}$$

en considérant les précipitations journalières tombées durant les 6 jours précédant la crue.

Le coefficient K a été fixé à 0.8 (valeur définie comme étant la plus significative après une série de tests préliminaires).

L'aptitude relative des 3 paramètres ainsi définis à expliquer la saturation du bassin est illustrée par le tableau 2.9 ci-dessous qui donne les résultats d'un test de corrélation multiple qui met en relation d'une part la lame ruisselée prise comme variable à expliquer, d'autre part la lame précipitée et les indices de saturation du bassin, prises comme variables explicatives.

Les résultats de la corrélation multiple, basée sur la méthode de sélection des variables de "STEPWISE" montre que l'indice le plus significatif est la capacité apparente moyenne d'infiltration I A M.

En effet après avoir sélectionné la lame précipitée qui présente le coefficient de corrélation simple le plus élevé (0.8) le programme sélectionne la variable I A M qui a permis d'expliquer la plus grande part de la variance résiduelle.

La variable Q_0 qui présente le coefficient de corrélation simple le plus fort n'a pas été sélectionnée du fait de sa corrélation non négligeable avec la 1ère variable explicative I P.

VARIABLE : AMOUNT OF PRECIPITATION IN INCHES : EPA
 VARIABLE : DATE OF LAST INITIAL : 90
 VARIABLE : TRANSLATOR APPARENTLY NOYAL : 5AM

VARIABLE DEPENDANT : TIME RUNS LEFT : 10
 COEFFICIENTS OF CORRELATION SIMPLE

1.0
 .3 1.00
 .71 .75 1.00
 .67 .70 .91 1.00
 .70 .87 .70 1.00

VARIABLE NUMERO 1 VARIABLE INTRODUCED 1
 COEFF TYPE RESIDUAL: 7.371
 COEFFICIENT OF CORRELATION MULTIPLE: .80
 TEST GLOBAL ADJUSTMENT, F(1, 57) = 196.0
 TEST CONSTANT: 5.1068

VARIABLE	COEFF	CONST	TYPE	T	STUDENT	CRIT
1	.4179	.0000		10.3090	.0007	

VARIABLE NUMERO 2 VARIABLE INTRODUCED 2
 COEFF TYPE RESIDUAL: 5.007
 COEFFICIENT OF CORRELATION MULTIPLE: .881
 TEST GLOBAL ADJUSTMENT, F(2, 57) = 92.0
 TEST CONSTANT: 1.1707

VARIABLE	COEFF	CONST	TYPE	T	STUDENT	CRIT
1	.4316	.0000		11.0077	.0000	
2	.5749	.0000		11.6277	.0000	

VARIABLE NUMERO 3 VARIABLE INTRODUCED 3
 COEFF TYPE RESIDUAL: 5.077
 COEFFICIENT OF CORRELATION MULTIPLE: .90
 TEST GLOBAL ADJUSTMENT, F(3, 54) = 91.0
 TEST CONSTANT: 0.0000

VARIABLE	COEFF	CONST	TYPE	T	STUDENT	CRIT
1	.7010	.0000		11.0756	.0000	
2	.5022	.0000		11.3568	.0000	
3	.4195	.0000		11.0756	.0000	

VARIABLE NUMERO 4 VARIABLE INTRODUCED 4
 COEFF TYPE RESIDUAL: 5.070
 COEFFICIENT OF CORRELATION MULTIPLE: .90
 TEST GLOBAL ADJUSTMENT, F(4, 53) = 91.0
 TEST CONSTANT: 0.0000

VARIABLE	COEFF	CONST	TYPE	T	STUDENT	CRIT
1	.3096	.0000		11.0722	.0000	
2	.0104	.0000		11.6734	.0000	
3	.4920	.0000		11.0756	.0000	

Il ressort de cette analyse que :

- le meilleur indice de saturation du bassin (infiltration apparente moyenne) paramètre inconnu au départ du ruissellement ne peut être utilisé en prévision.(1)

- d'une façon générale, l'influence des conditions initiales de saturation du bassin est négligeable par rapport à celle de la précipitation génératrice : ce qui confirme le caractère plutôt imperméable du bassin.

5.2.3.- Le ruissellement :

Les paramètres caractérisant le ruissellement sont calculés à partir des hydrogrammes de crues :

- débit de pointe : Q_p (m^3/s)
- débit moyen \bar{Q} (m^3/s)
- volume ruisselé : V_R calculé par planimétrie de l'hydrogramme (exprimé en Millions de m^3).
- lame ruisselée L_R (exprimée en mm)
- coefficient de ruissellement
- temps de base T_b (heures)
- temps de montée t_m (heures).

5.2.4.- Les transports solides en suspension :

Les paramètres correspondant aux transports en suspension sont calculés à partir des courbes $C(t)$ et $Q_S(t)$:

- Apport solide de la crue calculée par planimétrie de la courbe $Q_S(t)$ noté A_S (exprimé en Milliers de tonnes).
- Concentration maximale : C_p (g/l).
- Concentration moyenne de la crue : $\bar{C} = \frac{A_S}{V_R}$ (g/l).

(1) La mise au point d'un indice de saturation plus significatif, à partir des précipitations doit pouvoir être effectuée dans un objectif de prévision de débits, mais ne rentre pas dans le cadre de cette étude.

TABLEAU 2.10 CARACTERISTIQUES DES HYDROGRAMMES ET TURBIDIGRAMMES DE 34 CRUES
OBSERVEES SUR L'OUED ALLALAH A WIDJAFACHA (07-12-3-1)

PERIODE 7-1989

PERIODE 7-80																					
N°	DATE	PRECIPITATION				INDICE DE SATURATION DU BASSIN		HYDROGRAMME DE CRUE										TURBIDIGRAMME			OBSERVATIONS
		IP mm	EC mm	ISU mm	R	LPA mm	Qo mm	Ium mm	CP mm	Q mm	VR mm	LR mm	KQ	TB mm	Im mm	T mm	CP mm	AS mm			
CRUES D'AUTOMNE ET D'ETE																					
1	05/10/75	34,2	43,5	22,0	20,8	5,0	0,5	16,0	30,5	23,6	1,02	3,46	0,10	6,0	0,5	164,5	276,0	128,4	Groupe 1 Crue complexe (G. 4a)		
2	07/11/75	8,5	169,3	11,0	2,7	37,4	2,0	7,0	47,0	78,7	0,93	3,15	0,37	18,0	9,0	34,6	114,0	55,7			
3	11/11/75	39,5	174,9	10,0	18,1	1,8	0,0	10,0	42,5	24,1	1,04	3,53	0,09	12,0	3,0	39,7	179,0	93,4			
4	14/11/75	7,0	138,2	10,0	2,2	10,4	1,0	5,0	64,9	27,7	0,60	1,90	0,27	6,0	0,5	141,7	198,0	84,7			
5	26/11/77	55,0	550,0	9,0	11,2	7	6,0	4,0	43,6	21,2	1,68	5,69	0,10	19,0	6,0	73,9	150,0	127,4	Crue unitaire (Groupe 1)		
6	17/12/78	31,0	626,1	33,0	29,3	11,0	0,0	30,0	56,9	20,0	0,36	1,22	0,04	5,0	0,5	150,0	240,0	55,8	Crue unitaire de caractère complexe du Groupe 1.		
7	25/11/78	50,6	1059,0	34,0	32,6	9,6	0,0	27,0	49,2	33,3	0,90	3,25	0,06	8,0	2,0	77,7	111,0	74,5	Crue complexe (G. 3a)		
CRUES D'HIVER ET DE PRINTEMPS																					
8	11/12/73	35,0	605,8	18,0	12,6	21,2	7,0	7,0	66,0	32,4	3,27	11,07	0,32	28,0	6,0	37,7	55,0	121,1	Groupe 3a		
9	19/12/74	24,5	465,9	12,0	8,2	15,6	2,0	9,0	35,9	27,1	0,78	2,64	0,11	9,0	4,0	67,1	75,0	52,3			
10	21/12/74	15,0	160,3	9,0	3,4	26,1	5,0	4,0	31,7	26,4	1,52	5,15	0,34	16,0	1,0	32,8	42,5	49,8			
11	24/12/74	2,5	35,2	3,0	0,2	28,7	2,0	0,5	52,7	18,1	0,52	1,76	0,88	8,0	1,0	88,4	110,0	46,1	Crue unitaire Groupe 1		
12	27/12/74	9,5	150,0	6,0	1,6	31,6	15,0	3,0	58,9	32,2	1,16	3,93	0,41	10,0	4,0	44,3	47,0	51,4	Groupe 1a		
13	29/12/74	39,0	717,9	14,0	14,7	1,2	0,0	7,5	55,4	32,8	2,08	6,81	0,17	17,0	4,0	38,9	60,3	78,3	Groupe 2.		
14	30-31/12/74	119,0	2336,5	15,0	51,2	39,5	7,0	3,0	485,0	214,7	17,93	60,97	0,51	31,0	12,0	55,6	80,0	1000,2	Crue caractéristique du Groupe 2.		
15	03/01/76	28,0	393,5	7,0	4,1	82,9	4,0	1,3	66,5	39,6	2,85	9,66	0,35	20,0	4,0	27,0	35,5	72,0	Groupe 1b (Crue de saturation)		
16	04/01/76	4,5	79,5	3,0	0,7	66,1	10,0	0,5	35,4	24,2	0,87	2,95	0,66	10,0	3,3	25,3	43,5	22,0	" "		
17	13/01/76	29,5	540,8	13,0	16,6	0,4	2,0	4,0	71,1	33,3	2,40	8,14	0,28	20,0	4,0	28,2	43,0	67,6	" "		
18	15/01/76	6,5	91,5	3,0	0,4	23,2	3,0	1,0	44,6	29,6	0,96	3,25	0,52	9,0	1,0	30,1	53,0	28,8	" "		
19	04/03/75	46,0	851,7	17,0	22,6	12,7	1,2	7,0	37,5	18,1	1,50	5,08	0,11	23,0	7,0	36,7	58,0	54,9	Groupe 1b		
20	20/03/75	24,0	519,1	24,0	21,2	13,0	0,6	24,0	79,7	11,9	0,73	2,47	0,10	17,0	3,0	30,1	105,0	36,7	Groupe 1b		
21	1-8/12/76	108,0	1533,2	14,0	30,1	44,0	9,0	2,0	500,0	221,0	16,83	57,27	0,53	31,0	12,0	50,9	60,0	863,3	Crue caractéristique du Groupe 2.		
22	26/12/76	9,5	222,2	11,0	3,6	20,7	1,2	7,0	45,8	14,6	1,26	4,27	0,45	24,0	10,0	42,0	67,5	53,4	" "		
23	08/01/77	12,0	158,6	7,0	1,6	7,1	0,5	3,5	58,0	12,5	0,64	2,14	0,18	14,0	3,0	36,8	54,5	23,2	" "		
24	24/01/77	32,5	433,3	12,0	11,1	0,0	0,2	6,0	78,9	29,0	1,40	4,95	0,15	14,0	4,5	49,7	74,0	72,5	" "		
25	20/01/78	12,0	184,4	13,0	3,4	3,3	0,4	9,0	26,0	13,0	0,56	1,90	0,16	12,0	0,5	38,0	41,0	32,5	" "		
26	19/12/78	35,5	541,5	13,0	6,6	2,5	0,0	4,0	43,6	26,9	0,97	3,20	0,09	10,0	2,5	49,0	64,0	42,2	Groupe 1		
27	16/01/79	42,0	784,2	15,0	17,7	11,4	11,0	6,0	28,0	47,6	2,4	8,14	0,19	16,0	7,0	51,4	73,0	122,7	Groupe 1.		
28	26/02/79	56,0	1110,6	14,0	22,7	13,2	6,0	3,0	32,0	77,8	8,11	7,48	0,19	17,0	3,0	53,4	73,7	122,7	Groupe 1.		
29	01/02/79	55,0	1007,0	14,0	26,5	10,6	4,0	6,0	183,0	78,4	5,08	18,23	0,11	16,0	3,5	35,0	10,0	172,0	" "		
30	04/11/77	82,6	155,5	18,0	44,8	21,9	24,0	2,0	594,0	233,9	12,63	42,83	0,15	15,0	6,0	44,9	62,0	114,4	" "		
31	27/12/77	34,5	759,3	13,0	22,0	18,0	1,5	14,0	56,9	23,3	0,67	2,27	0,14	8,0	1,0	40,4	112,0	141,5	Crue unitaire Groupe 1		
32	15/01/80	33,0	50,0	7,0	6,5	23,9	16,0	1,0	262,0	53,4	6,84	23,19	0,70	11,0	12,0	56,1	67,0	111,8	Groupe 2.		
33	05/01/80	37,5	417,3	10,5	10,2	12,4	6,0	1,0	259,0	23,2	5,12	18,12	0,12	12,0	5,0	68,4	103,0	151,4	" "		
34	08/03/80	7,0	153,6	12,0	2,7	25,5	1,5	4,0	1,0	1,0	3,47	0,47	7,0	0,5	42,8	68,0	43,6	Groupe 1			

VI.- ANALYSE ET INTERPRETATION DES EVENEMENTS AVERSE-CRUE-TRANSPORT SOLIDE :

6.1.- Classification et analyse des crues sélectionnées:

Parmi les facteurs susceptibles d'influer sur les caractéristiques du ruissellement on peut distinguer :

- la saison, par son influence sur la couverture végétale du bassin.
- l'état de saturation du sol.
- la structure de la précipitation génératrice (distribution spatiale et temporelle).

Les 34 crues sélectionnées pour cette étude ont été classées suivant 3 groupes, en fonction de ces différents facteurs.

GRUPE N° 1 : Les crues d'orage localisées et brutales constituent un 1er cas extrême typique. Ces crues arrivent généralement en automne. elles sont provoquées par des averses de début de saison, de type orageux, de courtes durées (4 à 6 heures) avec fortes intensités (supérieures à 20 mm/h pour les précipitations de 30 mn).

Les averses sont généralement localisées dans l'espace et se produisent sur des sols secs.

Les crues générées par ces averses sont caractérisées par des temps de réponse et de montée très courts (0.5 heure). Les temps de base sont de l'ordre de 4 à 6h (ce qui montre le caractère local du ruissellement, le temps de base standard étant pour ce bassin de l'ordre de 10 à 12h). Les capacités d'infiltration apparentes sont élevées (20 mm/h).

Les débits de pointe de ce type de crue peuvent être importants, dépassant $100 \text{ m}^3/\text{s}$ (crues du 1/10/73 et du 2/05/76), mais les lames ruisselées restent toujours très faibles dépassant rarement 5 mm.

Ces précipitations de début de saison produisent des concentrations en sédiments considérables atteignant en pointe des valeurs remarquables (on a observé 296 g/l durant la crue du 3/11/75).

De nombreuses crues de ce type ont été observées durant la période 72/80. Parmi celles qui ont été sélectionnées pour avoir été observées correctement en turbidité, nous mentionnerons les crues N° 1, 4 et 6. La crue N° 6 observée le 17/10/78 est la ^{plus} caractéristique.

L'examen des hyétogrammes d'averse de cette crue montre une précipitation génératrice concentrée, intense, qui semble couvrir l'ensemble du bassin (ayant été observée simultanément avec des hyétogrammes identiques à BENARIA et BORDJ ABOU EL HASSEN). Mais la généralisation de la précipitation n'entraîne pas systématiquement la généralisation du ruissellement. Il semble que pour ces crues de début de saison le ruissellement reste localisé sur la partie Est du bassin.

En effet la branche de l'oued ALLALAH ne ruissellera que très difficilement durant cette période de l'année. Une grande partie des précipitations d'Automne sera entièrement absorbée par les vertisols profonds et secs qui ne pourront donner du ruissellement rapide qu'après fermeture des fentes de retrait et imperméabilisation par saturation.

Les seules parties du bassin qui peuvent ruisseler durant cette saison, sont celles constituées dans les marnes du Carténien, imperméables, même sans préparation, ne comportant pas de fissures de retrait.

On rencontre ces terrains dans la partie aval des bassins des oueds BOU HALLOU et BEN ALI, situés justement à proximité de l'exutoire.

Dépourvues de végétation, ces collines marneuses disséquées, où dominent les ravines hiérarchisées et les badlands sont seules à pouvoir réagir brutalement à ces premières précipitations.

La réponse immédiate de l'hydrogramme, son temps de montée très court, sa forme pointue confirment bien l'origine des crues de ce groupe.

Partant de ces constatations, nous pouvons affirmer que les crues du premier groupe réputées crues d'Automne peuvent en fait, survenir en n'importe quelle saison (crues N° 11, 31, 34) et sont en réalité le résultat d'un ruissellement exclusif de la partie Est du bassin qui est la seule susceptible de répondre de façon quasi instantanée à une précipitation de très courte durée (une demi-heure) inférieure à 30mm.

Le dénominateur commun des crues de ce groupe semble être la forme de leurs hydrogrammes et la valeur de leurs concentrations (150 g/l).

GROUPE N° 2 : Les fortes crues généralisées :

Ce groupe, qui constitue l'autre extrême, est illustré par les crues N° 14, 21, 28, 29, 30, 32 et 33. Ces crues surviennent généralement durant les saisons d'hiver et de printemps, et plus particulièrement durant les mois de Février et Mars : Elles sont générées par des précipitations de type cyclonique, frontal généralisées dans l'espace, longues, régulières, continues, présentant des intensités faibles ou moyennes. Les totaux précipités sont généralement importants sans être nécessairement exceptionnels : L'analyse fréquentielle des précipitations journalières montre que des crues de ce type peuvent être dûes à des précipitations de fréquence biennale (crues N° 26 du 26/02/79 et N° 29 du 1/03/79).

Se produisant sur des sols saturés et imperméables elles entraînent des ruissellements importants et généralisés sur l'ensemble du bassin (coefficient de ruissellement supérieur à 50%, infiltration apparente moyenne inférieure à 3 mm/h). La complexité des hydrogrammes correspondant à ce type de crues est liée à la complexité de la structure de l'averse et à sa répartition dans l'espace, d'une part, et d'autre part, aux différences de comportement hydrologique des 2 branches principales du bassin.

Il arrive cependant que les 2 branches ruissellent simultanément, ce qui se traduit à l'exutoire du bassin, par une crue du type de celle observée le 2/03/79 (crue N° 30) qui présente de ce fait les caractéristiques d'une crue unitaire.

Les précipitations génératrices des crues de ce groupe sont généralement d'orientation NORD-OUEST/SUD-EST. Elles touchent la branche OUEST du bassin (ABOU EL HASSEN) 1 à 2 heures avant d'arriver sur la branche EST (BENARIA).

Cette situation a été constatée lors des crues du 2/02/76, du 21/12/79 et du 5/03/80 (33). Mais la branche EST, compacte et pentue, réagit toujours plus vite que la branche OUEST, allongée, de faible pente, comportant une importante nappe alluviale.

Dans ces conditions, le retard de réception des précipitations est compensé par la rapidité de réaction : le ruissellement se fait simultanément sur les 2 branches et se traduit par des crues violentes et dangereuses, présentant des hydrogrammes unitaires à très fort débit de pointe : Des débits spécifiques supérieurs à $1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ sont observés lorsque la durée de la pluie efficace se rapproche du temps de concentration du bassin (8 à $10H$).

Les turbidités correspondant à ce type de crues sont relativement faibles, ce qui pourrait s'expliquer par la conjugaison de diverses conditions favorables :

- La saison (présence d'une couverture protectrice, formation d'une pellicule de battance).

- L'état de saturation du sol. (Les terrains humifiés se comportent comme un milieu imperméable et cohérent, résistant mieux à l'érosion).

- La nature des précipitations (qui, durant cette saison présentent des intensités faibles ou moyennes peu agressives).

En réalité, si on examine de plus près les 7 crues appartenant à ce groupe, on constate que les précipitations génératrices sont très variables d'une crue à l'autre, (30 à 120 mm), de même que leur intensité maximale et leur agressivité dont l'amplitude varie de 6 à 50, alors que les concentrations moyennes en sédiment restent peu variables et tendent vers une valeur constante limite qui se rapproche de 50 g/l.

On peut alors s'interroger sur l'influence de la nature, de l'importance ou de l'intensité des précipitations sur les turbidités moyennes de ces crues.

Lors de ces crues à ruissellement généralisé, la faiblesse relative des charges en suspension peut s'expliquer par le fait que les parties peu érodées du bassin (grès quartziteux lithologiquement résistants et boisés ; argiles helvétiques à seuil de rétention élevée) participent au ruissellement en diluant les eaux chargées provenant des zones érodées.

Ainsi par exemple, le ruissellement de la zone des vertisols initialement perméables devient prépondérant après saturation, par rapport à celui de la zone marneuse de superficie plus faible.

Les écoulements hypodermiques ne sont pas négligeables en crue sur ce type de sol, et sont naturellement peu chargés.

Les fortes concentrations des eaux provenant des bad-lands sont ainsi diluées.

GROUPE N° 3 : Les crues intermédiaires :

Cette série intermédiaire entre les deux cas extrêmes précédents comportera :

a)- des crues d'automne, provoquées par des précipitations intermittentes et désorganisées, d'intensité faible ou moyenne, entraînant un ruissellement semi-généralisé.

sont
Ces crues/caractérisées par des hydrogrammes complexes (crues N° 2, 3, 5 et 7). Les sols sont secs et mal protégés mais la persistance des précipitations se traduit par des volumes ruisselés relativement importants entraînant une dilution des charges solides. Les concentrations peuvent atteindre en pointe des valeurs importantes (150 g/l) mais les valeurs moyennes sont relativement faibles si on les compare aux crues du 1er Groupe (70 g/l).

b)- Des crues d'hiver ou de printemps provoquées par des précipitations courtes, peu importantes, localisées.

Les hydrogrammes sont caractérisés par des formes étalées, des débits faibles ou moyens (50 m³/s).

Les concentrations moyennes sont les plus faibles de la série (30 g/l).

Il semble que ces crues restent localisées sur les zones peu érodées du bassin (ravines individualisées sur les argiles, peu marquées, frange Nord Ouest du bassin).

Les crues N° 15, 16, 17 et 18 sont caractéristiques de ce groupe.

6.2.- Analyse de quelques crues démonstratives annexes :

Un certain nombre de crues n'ayant pas satisfait au critère de sélection fixé ($Q_p > 20 \text{ m}^3/\text{s}$) n'ont pas été retenues dans l'échantillon initial.

Cependant leur examen nous a paru présenter un intérêt démonstratif des hypothèses suggérées par l'analyse de l'échantillon préliminaire.

6.2.1.- Etude du comportement de la zone SUD-OUEST du bassin (zone des argiles helvétiques).

Crues du 24/09/73 (A1)
du 14/10/74 (A2)
du 22/10/73 (A3).

L'examen des hyétogrammes relatifs à ces crues montre que les précipitations se sont concentrées sur la partie OUEST du bassin.

Les réponses lentes et difficiles des hydrogrammes, leurs formes étalées, la faiblesse des ruissellements ($LR = 1 \text{ mm}$) montrent que ces crues proviennent d'un ruissellement de la zone des vertisols et confirment l'hypothèse suggérée par l'examen des crues d'Automne du 1er groupe quant à la grande capacité d'absorption des vertisols durant cette saison.

Les concentrations moyennes associées à ces crues sont de l'ordre de 60 à 70 g/l.

6.2.2.- Etude de la variabilité de la concentration moyenne : crues du 6/04/78 (A4) et du 20/09/79 (A5).

La comparaison de ces 2 crues qui diffèrent par la saison, par le total précipité et par l'intensité des averses, nous paraît assez démonstrative de l'influence négligeable que peuvent avoir ces facteurs sur le paramètre turbidité.

En effet si on se base sur les enregistrements du poste pluviographique de BORDJ ABOU HASSEN on constate qu'avec une précipitation négligeable ($IP = 2.0 \text{ mm}$ $I_{30} = 1.0 \text{ mm/h}$), la crue A4 présente un turbidigramme équivalent à celui de la crue A5 qui est provoquée par une précipitation de 44 mm et une intensité maximale de 56 mm/h.

Une constatation analogue peut être effectuée à l'examen comparatif des crues N° 4 et 6 qui présentent des turbidigrammes et des concentrations moyennes similaires pour des précipitations génératrices très différentes.

L'examen de ces deux couples de crues montre qu'il existe un dénominateur commun qui est la forme de l'hydrogramme et confirme l'hypothèse faite à l'examen des crues du 1er Group. Ainsi la turbidité moyenne ne semble dépendre que du secteur générateur du ruissellement.

VII.- ETUDE STATISTIQUE DES RELATIONS AVERSE-CRUE-TRANSPORT SOLIDE :

7.1.- Relation précipitation-ruissellement :

7.1.1.- Analyse en corrélation :

La figure 2.9 illustre une analyse en corrélation entre lame précipitée et lame ruisselée.

Pour les besoins de cette analyse nous avons cherché à améliorer l'estimation de la lame précipitée moyenne sur le bassin en utilisant les données des postes de BORDJ ABOU EL HASSEN et BENARIA, auxquelles nous avons appliqué un coefficient de pondération de THIESSEN.

L'examen du nuage de points montre une forte dispersion de LR pour les valeurs de IP inférieures à 50 mm : La variance conditionnelle de LR, sachant IP, semble augmenter avec IP.

Au delà de 50 mm, la corrélation s'améliore nettement et une liaison apparaît entre lame précipitée et lame ruisselée suivant une courbe exponentielle.

Cette constatation suggère d'aborder séparément l'analyse en corrélation après avoir distingué les crues appartenant aux deux groupes principaux définis précédemment.

A ce stade de l'analyse, il nous a paru nécessaire de préciser de façon plus rigoureuse, le critère de séparation des crues.

Il apparaît qu'une séparation doit être effectuée en considérant le caractère localisé ou généralisé du ruissellement.

Le ruissellement peut être localisé ou généralisé en fonction de la saison, des conditions de saturation du bassin, de la répartition des précipitations.

Cependant, l'influence de la saison est prépondérante : Nous avons vu au chapitre précédent qu'en Automne, le ruissellement reste pratiquement localisé sur la partie aval de la branche Est du bassin (zone marneuse imperméable sans fissures de retrait) même lorsque les précipitations semblent couvrir l'ensemble du bassin.

Au printemps la probabilité d'occurrence d'un ruissellement généralisé est très forte du fait de la conjugaison favorable des facteurs nature des précipitations et état de saturation du bassin.

Parmi les critères susceptibles de caractériser la nature localisée ou généralisée du ruissellement, les plus caractéristiques sont ceux relatifs à la forme de l'hydrogramme, pouvant être caractérisé par le temps de montée (T_m), le temps de base (T_b), le rapport Q_p/LR .

Les hydrogrammes des crues localisées de ce bassin sont généralement caractérisés par :

$$T_m < 2 \text{ h}$$

$$T_b < 8 \text{ h}$$

$$Q_p/LR > 20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{mm}.$$

L'application de ce critère s'est avérée, dans l'ensemble suffisamment efficace et a permis de distinguer 2 grandes familles :

- Les crues généralisées, avec forte probabilité d'occurrence au printemps.

- Les crues localisées, avec forte probabilité d'occurrence en automne (1).

L'individualisation des crues appartenant à ces 2 familles sur le nuage de points initial du graphique de la figure 2.9 fait nettement apparaître 2 tendances. Ce qui autorise l'ajustement d'une regression différente pour chaque famille.

Les variables étudiées étant distribuées suivant des lois exponentielles, nous avons procédé à une anamorphose des variables IP et LR suivant l'algorithme :

$$U_i = L_n \left[L_n - \frac{A}{a x_i} \right]$$

qui transforme une variable qui suit une loi exponentielle en variable presque normale.

$A = \text{constante} = 19.07.$

$\left(\frac{1}{a} \right)$: gradex de la droite d'ajustement de GUMBEL égal ici à 16.75).

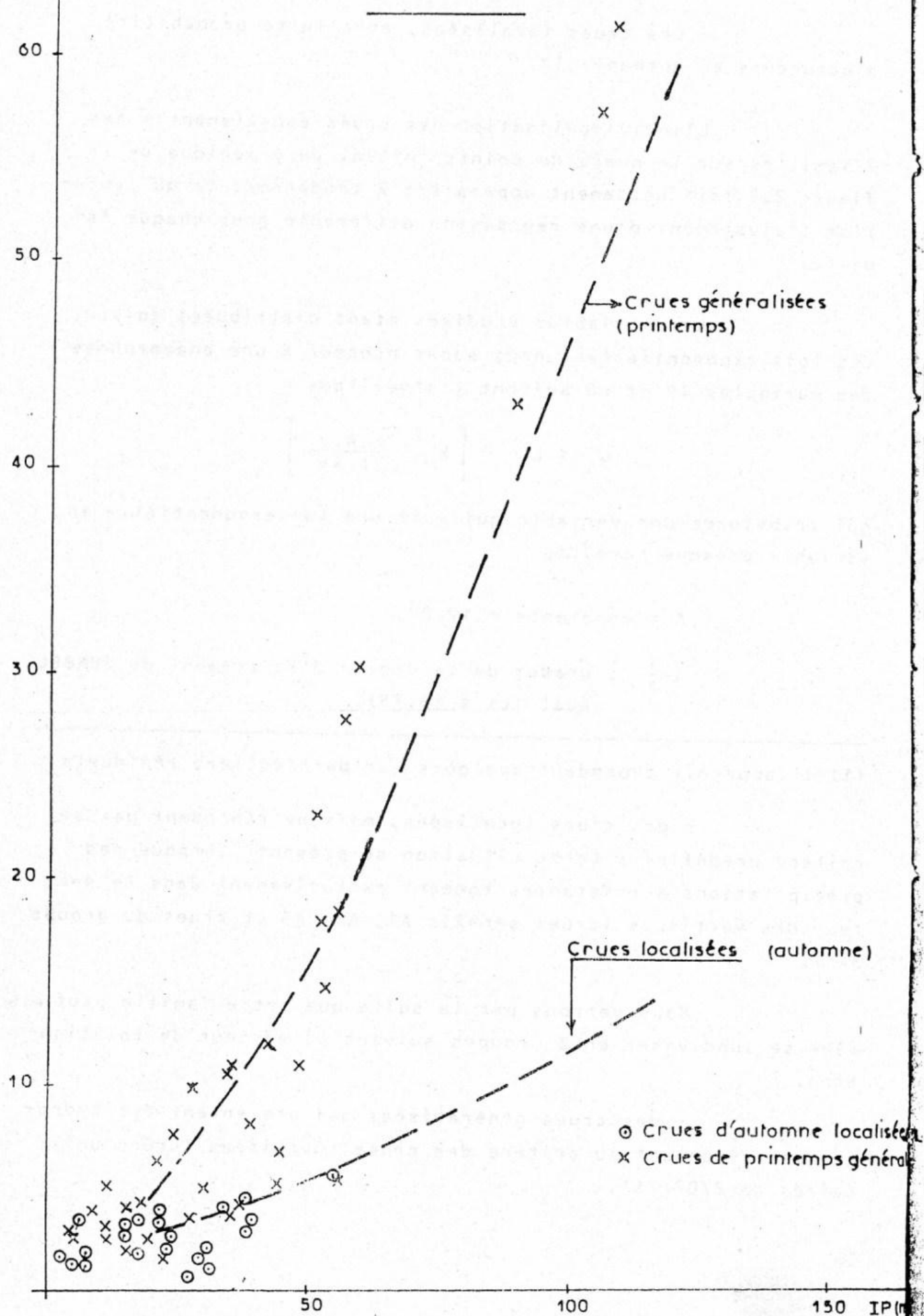
(1) Il apparaît cependant quelques cas particuliers résiduels :

- des crues localisées, mais ne répondant pas au critère prédéfini ; Cette situation se présente lorsque des précipitations persistantes tombent exclusivement dans le secteur des vertisols (crues annexes A1, A2, A3 et crues du groupe 3A).

Nous verrons par la suite que cette famille peut elle-même se subdiviser en 3 groupes suivant le secteur de localisation.

- des crues généralisées qui présentent des hydrogrammes répondant au critère des crues localisées (crues unitaires du 2/02/76).

FIG.2.9: CORRELATION LAME PRECIPITEE LAME RUISSLEE
A L'ECHELLE DE LA CRUE



Sur le nuage de points obtenu après anamorphose (fig. 2.10), nous avons pu individualiser les 2 groupes de crues et ajuster 2 droites de corrélation. Après transformation inverse, ces 2 droites deviennent des courbes exponentielles que nous retraçons sur la figure 2.9 initiale.

Il se confirme donc que les lames ruisselées, correspondant aux crues généralisées, étroitement liées aux précipitations ($R = 0.86$) peuvent être correctement prévisibles à partir de celles-ci.

7.1.2.- Analyse fréquentielle :

La figure 2.11 donne la distribution statistique sur papier de GUMBEL des précipitations maximales en 12 heures observées au poste de ABOU EL HASSEN.

Sur le même graphique on porte la distribution des débits de pointe et des lames ruisselées des crues supérieures à $20 \text{ m}^3/\text{s}$ observées à l'exutoire du bassin.

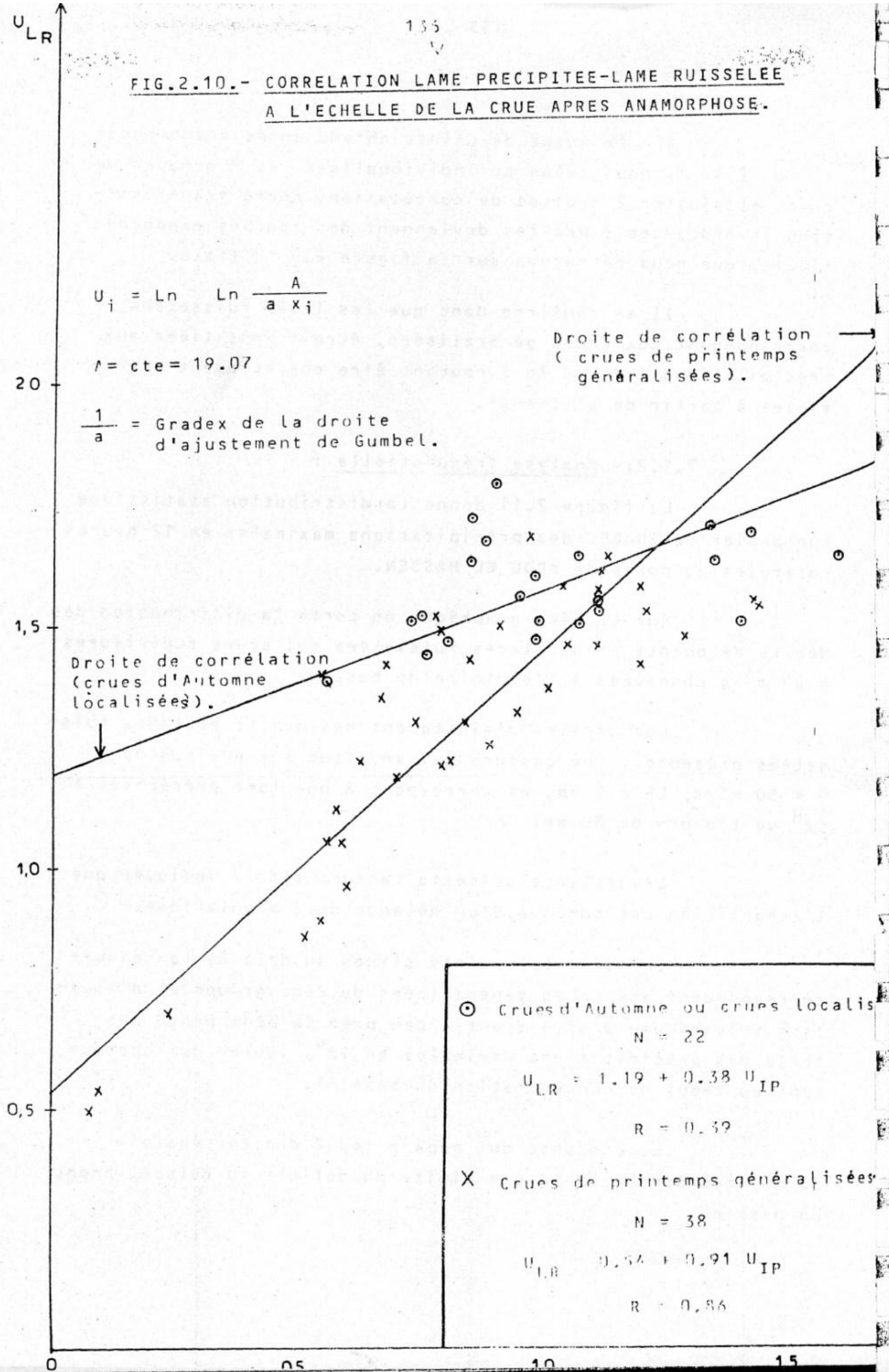
Les droites d'ajustement des débits et lames ruisselées présentent une cassure qui se situe aux environs de $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$, $LR = 5 \text{ mm}$, et correspond à une lame précipitée en 12^H de l'ordre de 30 mm.

L'existence de cette cassure semble indiquer que l'échantillon est composé d'un mélange de 2 populations.

En effet les points situés au delà de la cassure correspondent aux crues généralisées du 2ème groupe et s'ajustent suivant une droite ayant à peu près la même pente que celle des précipitations maximales en 12^H , (durée qui correspond au temps de concentration du bassin).

La distance qui sépare les 2 droites, égale à 30 mm, représente la valeur limite du déficit au ruissellement du bassin.

FIG.2.10.- CORRELATION LAME PRECIPITEE-LAME RUISSELEE
A L'ECHELLE DE LA CRUE APRES ANAMORPHOSE.



Cette constatation nous amène à reprendre l'analyse statistique de l'échantillon en considérant séparément les 2 familles de crues définies précédemment.

L'examen des résultats obtenus (fig. 2.12) appelle les observations suivantes :

1)- La distribution des crues localisées indique que ces crues ne produiront jamais un ruissellement supérieur à 10 mm.

2)- La distribution des crues généralisées présente toujours une cassure de $LR = 5$ mm, due probablement à l'existence dans cet échantillon de crues mal développées (crues hypodermiques).

3)- Il apparait pour les crues généralisées de printemps une relation statistique équifréquentielle entre les lames ruisselées et les précipitations maximales en 12H.

4)- Le seuil de rétention du bassin est de l'ordre d'une trentaine de millimètres.

FIG.2.11. OUED ALLALAH A SIDI AKACHA:

STATISTIQUE DES DEBITS DE POINTE ET DES LAMES
RUISSELEES (CRUES > 20 m³/s)

- POSTE DE BORDJ ABOU EL HASSEN:
STATISTIQUE DES PRECIPITATIONS EN 12 h.

1/09/73 au 31/08/80 (7ans)

• P₁₂
x QP
o LR

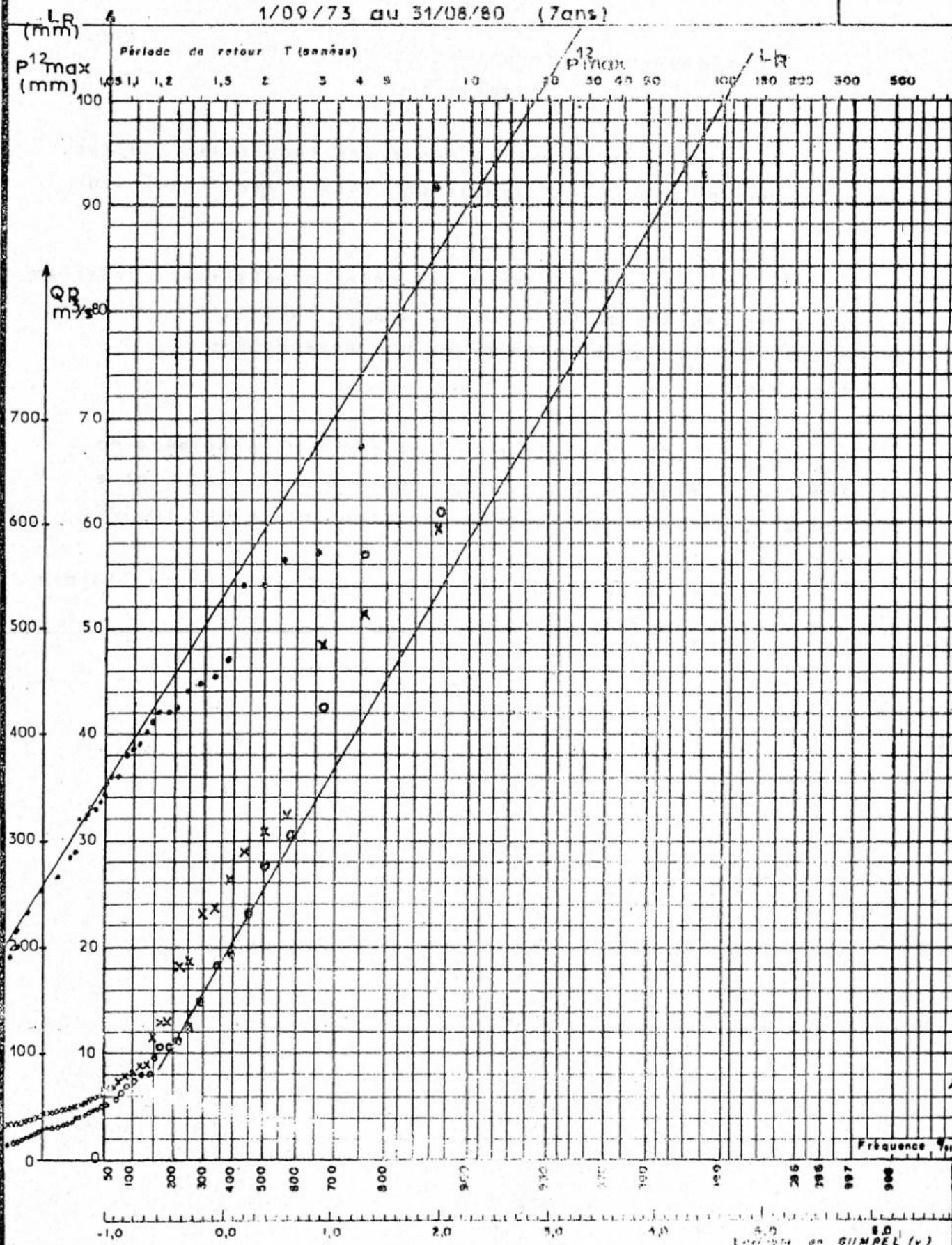


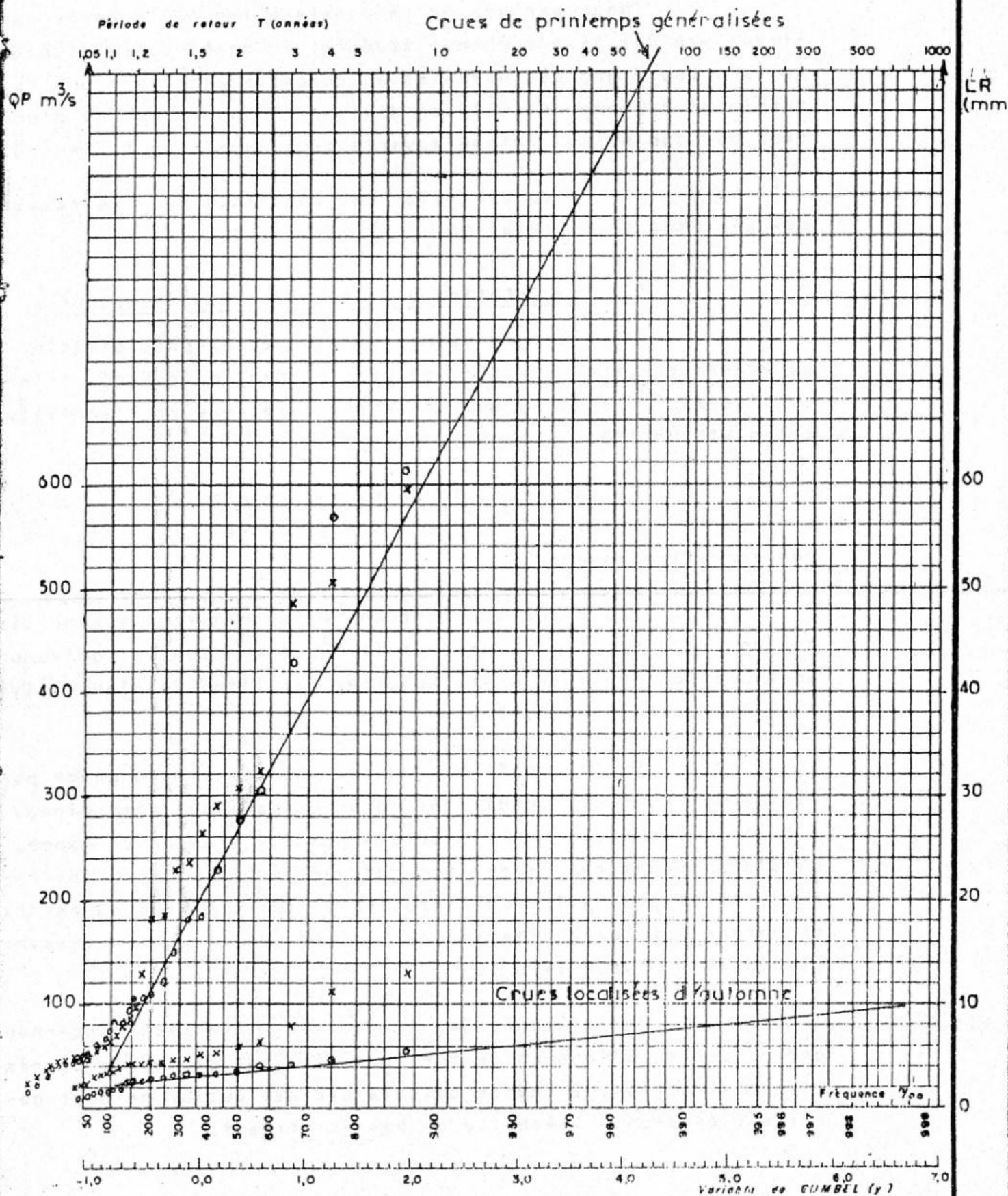
FIG.2.12 : OUED ALLALAH A SIDI AKACHA

STATISTIQUE DES DEBITS DE POINTE ET DES LAMES

RUISSELEES (CRUES > 20 m³/s)

APRES REPARATION DES CRUES GENERALISEES ET LOCALISEES

o LR (mm)

x QP (m³/s)

7.2.- Relation précipitation-ruissellement-transport solide :

Nous partons de la constatation faite après examen et analyse des 34 événements étudiés, et après classification suivant les 3 groupes définies au chapitre précédent que la turbidité moyenne calculée en divisant l'apport solide d'une crue par son volume ruisselé varie peu d'une crue à l'autre. Cette constatation est confirmée par les résultats des analyses en corrélation.

7.2.1.- Relation précipitation-concentration :

Pour chaque événement étudié, la précipitation génératrice a été caractérisée par le total précipité, l'intensité maximale en 30 mn, l'énergie cinétique et l'agressivité selon WISCHMEIER.

Le tableau 2.11 donne les résultats d'une analyse en corrélation multiple entre ces différents paramètres, et la concentration moyenne.

Ces résultats montrent qu'il n'existe aucune liaison entre le total précipité et la concentration, et qu'aucune amélioration sensible n'est apportée par l'indice d'agressivité de WISCHMEIER ($R = 0.17$).

Ce qui confirme que cet indice mis au point par WISCHMEIER dans des conditions morphoclimatiques déterminées (plaines des Etats Unies) où prédomine l'érosion en nappe, ne s'adapte pas aux conditions qui prévalent en zone méditerranéenne et semi-aride où l'érosion linéaire et les sapements de berges sont prédominantes en liaison avec le ruissellement concentré (HEUSCH 1970).

Par ailleurs les travaux de WISCHMEIER concernant des parcelles d'érosion de quelques dizaines de mètres carrés. Par construction, l'indice calculé par cet auteur ne peut décrire l'érosion à l'échelle du bassin versant.

EE.2.11: REGRESSION CMOY = f (LP, EC, IMAX50, R).

VARIABLE 1 LAMP PRECIPITEFI : TP
 VARIABLE 2 ENERGIE CINETIQUE : EC
 VARIABLE 3 VITESSE MAX. 50 MN: VMAX 50
 VARIABLE 4 ACCELERATION : R

VARIABLE DEPENDANTE : CONCENTRATION MOYENNE: CMOY

	1	2	3	4	5
20.00	415.70	22.00	10.80	164.50	
1.00	036.50	13.00	0.50	59.60	
10.50	770.00	16.00	18.10	89.70	
7.00	130.20	14.00	2.20	141.70	
57.00	060.00	9.00	11.20	75.90	
31.00	624.10	33.00	29.30	159.00	
50.40	1050.00	34.00	52.60	77.70	
35.00	605.50	18.00	12.60	37.70	
20.50	065.80	12.00	6.20	67.10	
15.00	250.70	9.00	3.40	32.80	
2.00	35.20	10.00	.20	88.60	
0.50	180.00	8.00	1.60	44.30	
30.00	717.90	15.00	14.70	38.90	
110.00	2736.50	15.00	51.20	55.60	
20.00	398.50	7.00	4.10	27.00	
0.50	79.50	3.00	.70	17.20	
20.50	040.80	13.00	16.60	20.20	
7.00	91.50	3.00	.40	30.10	
40.00	051.70	17.00	22.60	36.70	
20.00	010.10	22.00	21.20	50.10	
100.00	1053.20	10.00	30.90	30.90	
0.50	022.20	11.00	3.40	42.00	
10.00	158.60	9.00	1.60	36.80	
30.00	633.70	16.00	11.10	49.70	
10.00	180.00	13.00	3.40	56.00	
70.00	051.50	11.00	6.60	49.00	
40.00	730.20	16.00	17.20	51.40	
50.00	1110.60	10.00	22.70	53.40	
50.00	1000.00	18.00	26.50	35.00	
80.00	1638.50	18.00	06.80	55.90	
30.00	759.00	18.00	20.00	60.40	
37.00	050.00	7.00	6.50	36.10	
17.00	690.70	10.00	10.20	48.50	
7.00	153.60	12.00	2.70	42.80	

T	MOYENNE	ECART-TYPE
1	34.51	27.63
2	600.06	524.70
3	10.77	7.06
4	15.26	14.61
5	50.51	33.82

COEFFICIENTS DE CORRELATION SIMPLE

1.00				
.99	1.00			
.20	.30	1.00		
.85	.87	.67	1.00	
.00	.02	.48	.17	1.00

7.2.2.- Relation ruissellement-concentration :

L'examen des planches de l'annexe 4 montre que les formes des turbidigrammes observés épousent généralement les formes des hydrogrammes correspondants. Les maxima de turbidité coïncident dans la majorité des cas avec les maxima de débit et les variations de turbidité et de débit au cours d'une crue donnée se font dans le même sens.

Cependant, si on représente les concentrations moyennes en fonction des lames ruisselées (fig. 2.13), on constate qu'il n'existe aucune liaison directe entre ces 2 variables. Tout se passe comme si le débit liquide n'était que le véhicule du transport solide dont l'importance est en fait déterminée par d'autres facteurs.

L'examen de la figure 2.13 rappelle la répartition d'une variable hétérogène dont les réalisations sont de structure différente de part et d'autre d'une valeur limite de $LR = 5 \text{ mm}$:

- les faibles lames ruisselées sont dues à des averses courtes et localisées, donc mal "moyennées" dans le temps et l'espace.

- Les fortes lames résultent d'un ruissellement généralisé sur un temps assez long.

Cette répartition illustre et confirme la classification des crues définie précédemment.

Les valeurs de concentrations moyennes des crues généralisées ($LR > 5 \text{ mm}$) tendent en moyenne statistique vers une valeur limite indépendante à la lame ruisselée. Cette valeur limite se rapproche de 50 g/l , et apparaît comme une constante du bassin liée uniquement à ses caractéristiques physiques.

FIGURE 2.13 - LAME RUISSELEE ET CONCENTRATION MOYENNE A L'ECHELLE DE LA CRUE

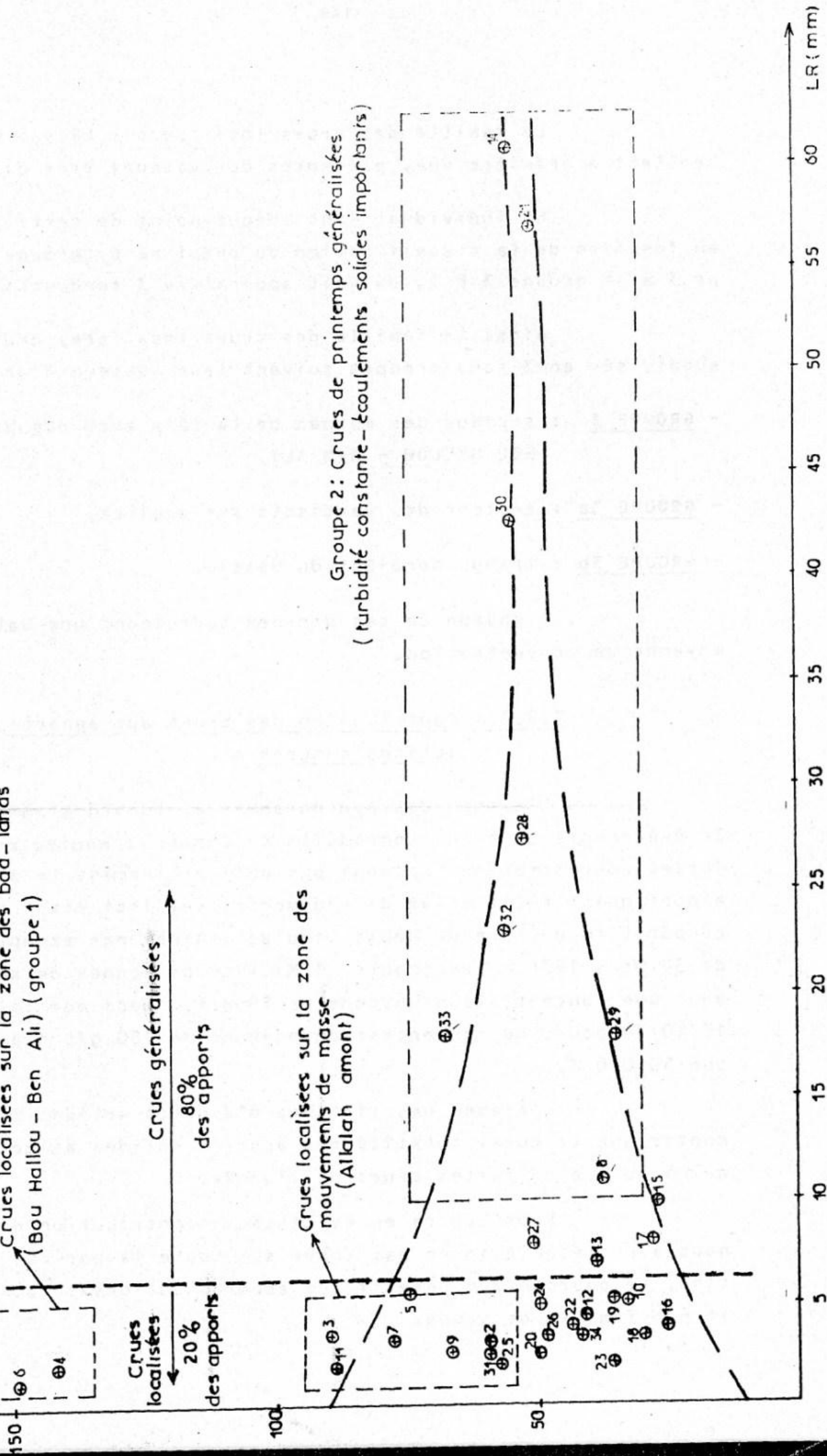
FIG. 2.13: RELATION LAME CRUELLE CONCENTRATION MOYENNE
A L'ECHELLE DE LA CRUE

Crues localisées sur la zone des bad-lands
(Bou Hallou - Ben Ali) (groupe 1)

Crues localisées 20% des apports
Crues généralisées 80% des apports

Crues localisées sur la zone des
mouvements de masse
(Allalah amont)

Groupe 2: Crues de printemps généralisées
(turbidité constante - écoulements solides importants)



La famille des crues localisées ($LR < 5 \text{ mm}$) semblent à première vue, présenter des valeurs très dispersées.

En individualisant chaque point de cette famille en fonction de la classification du chapitre 6 (groupe 1, groupe 3 a et groupe 3 b), on voit apparaître 3 tendances.

Ainsi la famille des crues localisées peut être subdivisée en 3 sous groupes suivant leur secteur d'origine :

- GROUPE 1 : secteur des marnes de la zone aval des bassins BOU HALLOU - BEN ALI.
- GROUPE 3a : secteur des vertisols sur argiles.
- GROUPE 3b : frange Nord-Est du bassin.

A chacun de ces groupes correspond une valeur moyenne de concentration.

7.2.3.- Contribution des crues aux apports solides annuels :

L'examen des hydrogrammes et turbidigrammes des 34 événements de crues reproduits en annexe II montre que les fortes concentrations ne sont pas obligatoirement le signe d'un apport quantitatif élevé de sédiments, celui-ci étant conditionné par l'importance du débit liquide : Ainsi par exemple la crue de 30 Mars 1974 a transporté 1 Million de tonnes de sédiments avec une concentration moyenne de 50 g/l, alors que la crue du 17/10/78 pour une concentration moyenne de 150 g/l n'a apporté que 50.000 T.

L'examen des listings d'apports solides journaliers montre que la quasi totalité des apports solides annuels est dû aux 5 ou 6 plus fortes crues de l'année.

Pour mettre en évidence la contribution de ces crues nous avons étudié année par année sur toute la période d'observation, le pourcentage relatif des apports solides totaux par crue et par famille de crues.

Le tableau 2.12 et la figure 2.14 résument cette analyse :

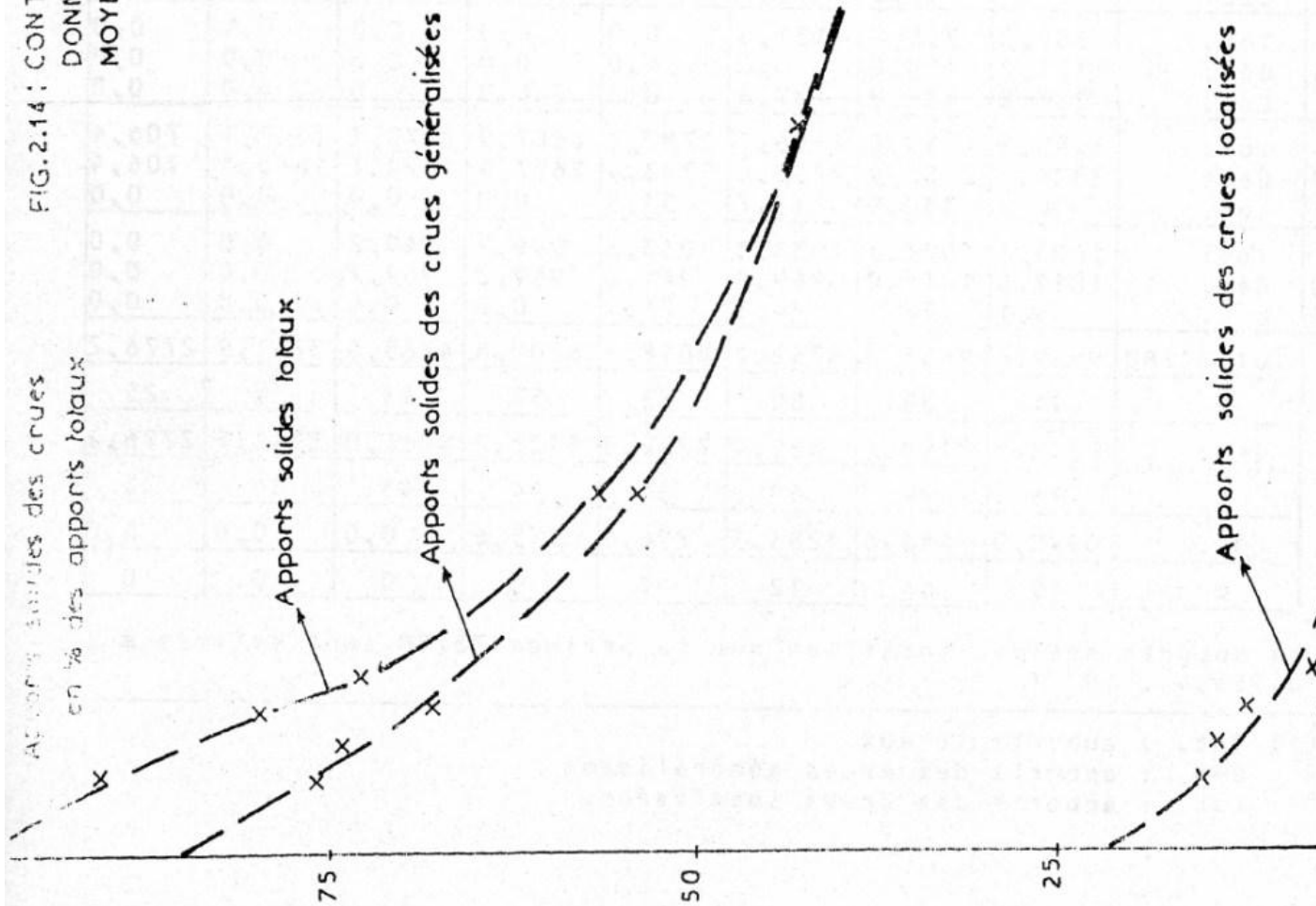
Tableau 2.12 : CONTRIBUTION DES CRUES AUX APPORTS SOLIDES
ANNUELS :

ANNEE	APPORTS SOLIDES DES CRUES (10 ³ T).	CRUES 20m ³ /s	" > 30	" > 40	" > 50	" > 100	" > 200	" > 300	" > 400
72/73	Tot. (1)	901,5	796,3	589,4	505,4	0,0	0,0	0,0	0,0
	Gén.	847,7	796,3	589,4	505,4	0,0	0,0	0,0	0,0
	Loc.	53,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
73/74	Tot.	2144,1	2144,1	1982,0	1831,2	1328,5	1190,8	1190,8	1190,8
	Gén.	1919,1	1919,1	1757,1	1647,4	1190,8	1190,8	1190,8	1190,8
	Loc.	224,9	224,9	224,9	183,8	137,7	0,0	0,0	0,0
74/75	Tot.	192,6	139,4	83,5	83,5	0,0	0,0	0,0	0,0
	Gén.	92,5	55,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Loc.	100,1	83,5	83,5	83,5	0,0	0,0	0,0	0,0
75/76	Tot.	1962,8	1908,4	1854,7	1705,7	1317,2	952,9	879,0	879,0
	Gén.	1333,6	1314,3	1314,4	1314,4	1179,3	952,9	879,0	879,0
	Loc.	629,2	594,1	540,3	391,2	137,9	0,0	0,0	0,0
76/77	Tot.	178,4	178,4	125,9	72,5	0,0	0,0	0,0	0,0
	Gén.	149,1	149,1	125,9	72,5	0,0	0,0	0,0	0,0
	Loc.	29,3	29,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
77/78	Tot.	309,0	255,8	137,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Gén.	171,2	118,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Loc.	137,8	137,8	137,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
78/79	Tot.	3165,5	3119,8	2946,1	2787,2	2607,9	1672,1	1672,1	706,4
	Gén.	2834,7	2788,9	2733,4	2733,4	2607,9	1672,1	1672,1	706,4
	Loc.	330,9	330,9	212,7	53,8	0,0	0,0	0,0	0,0
79/80	Tot.	1095,1	1095,1	1033,3	1033,3	949,2	949,2	0,0	0,0
	Gén.	1011,0	1011,0	949,2	949,2	949,2	949,2	0,0	0,0
	Loc.	84,1	84,1	84,1	84,1	0,0	0,0	0,0	0,0
TOT. 72/80		9949,6	9637,3	8752,7	8018,7	6202,8	4765,0	3741,9	2776,2
%		91	88	80	73	57	43	34	25
GEN.		8358,9	8152,6	7469,4	7222,3	5927,2	4765,0	3741,9	2776,2
%		76	74	68	66	54	43	34	25
LOC.		1590,0	1484,6	1283,3	796,4	275,6	0,0	0,0	0,0
%		15	14	12	7	3	0	0	0

Les apports solides totalisés sur la période 72/80 sont estimés à 10.956,4 . 10³ T.

- (1) Tot. : apports totaux
Gén. : apports des crues généralisées.
Loc. : apports des crues localisées.

FIG.2.14: CONTRIBUTION DES CRUES SUPERIEURES A UN SEUIL
 DONNE AUX APPORTS SOLIDES
 MOYENS ANNUELS (PERIODE 72/73 - 79/80)



Nous voyons à l'examen de ces résultats que :

- 25% des sédiments transportés durant 8 années d'observation sont dûs à la contribution des 3 plus fortes crues de la série (Mars 74, Février 76 et Mars 79).

- 91% des apports solides sont dûs aux crues $> 20 \text{ m}^3/\text{s}$.

- 80% des apports résultent des crues généralisées de printemps.

VIII.- SYNTHESE DES RESULTATS :

8.1.- Essai de quantification des formes d'érosion :

L'élément essentiel qui ressort de l'analyse des 39 crues étudiées est la faible variabilité du paramètre "concentration moyenne" pour un groupe de crues donné.

Ainsi, les crues du 1er groupe sont caractérisées par une concentration moyenne de 150 g/l.

Les crues du 2ème groupe ou crues généralisées fournissent 50 g/l quelle que soit l'importance du ruissellement.

Les crues du 3ème groupe appartiennent en réalité la famille des crues localisées et se regroupent suivant le secteur concerné par le ruissellement.

L'examen et analyse d'un grand nombre d'événements observés montrent par ailleurs que la concentration est très sensible à l'influence des facteurs qui conditionnent généralement le ruissellement (saison, précipitation, état de saturation des sols).

Par contre il apparait une liaison remarquable entre les caractéristiques des crues et l'origine du ruissellement.

On constate ainsi que les crues du 1er groupe proviennent exclusivement de la zone marneuse caractérisée par les ravines hiérarchisées et les bad-lands des bassins de BOU HALLOU et du BEN ALI (150 g/l).

On montre que les crues du 3ème groupe (série A) proviennent essentiellement du secteur des vertisols sur argiles helvétiques (60 à 70 g/l), tandis que la série 3B résulte probablement du ruissellement de la zone relativement et globalement peu érodable de la frange Nord-Ouest du bassin caractérisée par des ravinements localisés (30 g/l).

On démontre ainsi que l'on peut associer à chaque forme d'érosion une turbidité moyenne qui apparaît comme une constante de cette forme d'érosion.

Le planimétrage de la carte des formes d'érosion présentée à la figure 2.4 montre que si l'on excepte la zone alluviale, la répartition des formes d'érosion est la suivante:

Mouvements de masse	:	118 km ² , 43%, 70 g/l.
Bad-Lands et ravines hiérarchisées	:	29 km ² , 10%, 150 g/l.
Ravines localisées (frange Nord-Ouest)	:	35 km ² , 13%, 30 g/l.

Une pondération des concentrations moyennes associées à chaque forme d'érosion par le pourcentage de la superficie concernée nous amène à une valeur qui se rapproche de 50 g/l correspondant à la concentration moyenne observée lors des crues généralisées de printemps.

8.2.- Prévision des apports solides annuels à l'exutoire d'un bassin :

L'étude de la contribution des crues aux apports solides annuels montre que 80% des apports sont dûs aux crues généralisées de printemps.

L'analyse des turbidigrammes montre que la concentration moyenne correspondant à ces crues est une constante du bassin.

L'étude statistique des relations précipitation-ruissellement met en évidence une corrélation étroite entre lame précipitée et lame ruisselée pour les crues généralisées.

Ces résultats montrent par conséquent qu'il est possible d'envisager une simulation correcte des apports solides à l'échelle de l'évènement à partir d'une chronologie de précipitations.

C O N C L U S I O N :

En se basant sur les données géomorphologiques et hydroclimatologiques d'un bassin versant de 300 km² représentatif de la zone Tellienne, nous nous sommes efforcés de tirer quelques conclusions simples d'intérêt pratique.

Une analyse par photo-interprétation nous a permis de localiser et cartographier les principales formes d'érosion développées sur le bassin.

L'élaboration et l'analyse des cartes géomorphologiques nous a permis de montrer que des formes d'érosion caractéristiques pouvaient se développer sur des formations lithologiques déterminées;

Un échantillon représentatif des diverses conditions d'écoulements du bassin a pu être constitué.

L'interprétation des hydrogrammes, turbidigrammes et hyétogrammes d'averses observés à l'exutoire du bassin nous a permis :

- de localiser les zones du bassin les plus aptes à fournir les sédiments.
- de quantifier chaque forme d'érosion.

Un débit solide spécifique moyen à l'exutoire d'un bassin est le produit d'une concentration moyenne par une lame ruisselée.

L'étude séparée de ces 2 variables amène une meilleure compréhension du phénomène des écoulements solides.

On constate en effet que ces 2 variables n'obéissent pas aux mêmes facteurs.

La faible variabilité de l'une suggère de la rattacher aux facteurs hydrologiques permanents (conditions physiques du bassin). La forte variabilité de l'autre aux facteurs aléatoires (conditions météorologiques).

Une analyse statistique des événements combinée avec une étude séparée des paramètres ruissellement-turbidité nous a permis de constater :

1.- que la quasi totalité (80%) des apports solides était dûe à la contribution des crues généralisées de débit de pointe supérieur à $30 \text{ m}^3/\text{s}$ (100 l/s/km^2), provoquées par des précipitations supérieures à 30 mm.

2.- qu'au delà de ce seuil une bonne liaison existe entre lame ruisselée et lame précipitée.

3.- que la concentration moyenne des sédiments en suspension est un paramètre relativement peu variable qui tend vers une constante pour les débits supérieurs au seuil considéré.

4.- que cette valeur limite de concentration moyenne apparait comme une constante du bassin liée essentiellement à ses caractéristiques physiques dont la lithologie semble être le déterminateur commun.

Ces résultats en permettant d'améliorer la connaissance du caractère des écoulements solides des bassin de cette région ouvrent une perspective à une généralisation et permettent d'envisager l'élaboration d'outils simples et efficaces pour :

- la simulation et la prévision des apports solides sur les bassins non observés en vue d'optimiser la conception et la gestion des aménagements hydrauliques.

- la planification de la lutte contre l'érosion et la sédimentation des retenues.

TROISIEME PARTIE

SYNTHESE DES RESULTATS

RECHERCHE D'UNE RELATION ENTRE APPORTS
SOLIDES SPECIFIQUES MOYENS ANNUELS ET PARAMETRES
PHYSICO-CLIMATIQUES DES BASSINS,

INTRODUCTION :

Au cours des deux premières parties de notre étude, nous avons :

- présenté la méthode utilisée par le service hydrologique Algérien pour l'acquisition, le traitement et la mise en forme des données sur les transports solides.
- sélectionné un échantillon de 30 bassins représentatifs des différentes conditions physico-climatiques de l'Algérie non Saharienne.
- calculé les apports solides journaliers, mensuels et annuels observés durant la période 72/79 sur les bassins sélectionnés, ainsi que les paramètres physico-climatiques et hydrologiques correspondants.
- étudié sur un cas particulier à l'échelle de l'évènement de crue, les facteurs susceptibles de traduire l'érodabilité du milieu, d'une part, l'érosivité des précipitations d'autre part.

Nous allons, dans cette dernière partie tenter de synthétiser les différents résultats obtenus en vue de mettre au point un outil de prévision des apports solides spécifiques annuels à l'exutoire de bassins dépourvus d'observations hydrométriques.

On s'efforcera de ne considérer comme variables explicatives, que des variables faciles à calculer et disponibles en tout point du territoire.

L'interprétation des données et la mise au point des relations est basée sur la méthode d'analyse en régression multiple (Stepwise), la variable à expliquer étant le transport solide spécifique moyen annuel.

Les transports solides qui transitent à l'exutoire d'un bassin de grande taille au cours d'une année donnée ne sont jamais la résultante du seul processus érosif déclenché au cours de la même année.

Les petites crues érodent, mais leur effet peut ne pas être ressenti à l'exutoire du bassin. En effet ces petites crues n'ont pas une grande capacité de transport.

Elles intéressent de petites superficies du bassin et résultent de précipitations intenses, mais localisées et de courte durée (inférieure au temps de concentration du bassin).

Une grande partie des sédiments arrachés par ces crues, se déposent dans des zones d'attérissements intermédiaires.

L'accumulation a lieu, là où les moyens de transport ne sont plus capables d'assurer leur fonction de transport ; cela peut avoir lieu sur les versants, à leur pieds, dans le lit d'un oued, sur un cône de dejection...

L'existence même de ces ruptures de charge (cône, nappes alluviales, colluvions, éboulis...) est la preuve que le flux de matériel entre le point de départ et l'exutoire du bassin n'est pas continu.

Lors des fortes crues généralisées il se produit une reprise systématique et le transport jusqu'à l'exutoire des sédiments déposés par suite de processus érosifs déclenchés durant les mois, voire les années précédentes.

Les crues exceptionnelles observées en Tunisie en Septembre 1969 dans le bassin de l'oued ZEROUD et en Mars 1973 dans le bassin de la MEDJERDA illustre cette extraordinaire capacité de transport :

OUED	STATION	SUPERFICIE DU BASSIN (km ²)	APPORT SOLI DE SPECIFI QUE DE LA CRUE T/km ²	APPORT SOLI DE SPECIFI QUE MOYEN ANNUEL. (T/km ² /an)
ZEROUD Crue de Sept. 1969 (1)	SIDI SAAD	8950	30.726	2.300
MEDJERDA Crue de Mars 1973.	SLOUGHIA	20990	4.300	1.020

Pour palier à cette discontinuité spatio-temporelle, nous baserons notre étude sur les relations entre transports solides annuels et paramètres physico-climatiques sur des moyennes interannuelles suffisamment longues.

La moyenne calculée sur la période 72/79, comportant en Algérie une succession d'années sèches et humides peut être considérée globalement comme représentative d'une moyenne longue durée.

(1) Au cours de cette crue le lit de l'oued ZEROUD au site de la station de SIDI SAAD a été creusé jusqu'à 4 m de profondeur.

1.- DEFINITION DE LA VARIABLE ERODABILITE DU MILIEU :

1.1.- Corrélation lithologie-érodabilité :

La lithologie joue un rôle essentiel dans les processus érosifs ; la morphologie des versants, le couvert végétal et l'utilisation du sol, susceptible de nuancer cette influence sont dans la majorité des cas conditionnés par la lithologie.

L'exemple de l'oued ALLALAH a permis de montrer qu'à une formation lithologique donnée correspond une forme d'érosion déterminée et qu'à chaque forme d'érosion peut être associée une turbidité moyenne.

Il apparait aussi que les formations les plus sensibles à l'érosion sont les formations marneuses et argileuses du crétacé supérieur et du tertiaire.

Les même constatations ont pu être effectuées sur le bassin de l'oued ISSER à LAKHDARIA qui fait actuellement l'objet d'une étude approfondie des conditions géomorphologiques en liaison avec les processus érosifs.

La superposition de la carte des formes d'érosion sur la carte lithologique montre que dans cette région, l'érosion se développe essentiellement dans la zone des marnes schisteuses du crétacé supérieur et des argiles du miocène.

Les cartes lithologiques des trente bassins étudiés, ont été établies et interprétées à partir des cartes géologiques disponibles à différentes échelles. Des vérifications par photo-interprétation ont été effectuées.

L'interprétation de ces cartes vise essentiellement à définir une classification des terrains affleurants et des formations superficielles en fonction de leur résistance ou leur aptitude à fournir des sédiments. Cette typologie

simplifiée peut être affinée en étant combinée avec un critère morphologique ou de couvert végétal.

La majorité des bassins de l'Atlas Tellien sont constitué de formations complexes ou l'influence de la lithologie peut être fortement liée à la morphostructure. La disposition des couches peut nuancer ou modifier le comportement d'une formation lithologique donnée vis à vis des divers manifestations de la dynamique érosive.

Des visites de terrain systématiques ont été effectuées dans les zones accessibles des bassins versants étudiés et plus particulièrement dans les zones où les formations sont complexes et pour lesquelles il est difficile de définir à priori un degré d'érodabilité.

Une cartographie des formes d'érosion couvrant une grande partie des bassins étudiés a été élaborée récemment par le Ministère de l'Agriculture dans le cadre d'une "Etude d'inventaire des forêts de l'Algérie du Nord". Bien que schématiques, ces cartes qui reproduisent assez fidèlement les zones fortement érodées ont été utilisées pour confirmer l'interprétation des cartes lithologiques.

Le planimétrage des différentes formations cartographiées nous a permis de calculer le pourcentage des formations érodables qui coïncident presque toujours avec les formations marneuses et argileuses du crétacé supérieur et du tertiaire. Un indice lithologique d'érodabilité des bassins a ainsi été défini.

1.2.- Corrélation lithologie-concentration moyenne annuelle :

L'exemple de l'oued ALLALAH a montré que les concentrations moyennes varient peu d'une crue à l'autre pour les fortes crues généralisées.

Le tableau 3.1. confirme la stabilité relative de la variable concentration moyenne qui a été vérifiée sur 7 stations appartenant à différentes régions de l'étude pour lesquelles cette variable a été enregistrée, lors des 3 plus fortes crues de la période d'observation.

Tableau 3.1. : APPORTS SOLIDES ET CONCENTRATIONS MOYENNES OBSERVEES LORS DES 3 PLUS FORTES CRUES DE LA PERIODE D'OBSERVATION.

STATION	OUED	CODE	CRUES	As (10 ³ T)	\bar{C} (g/l)
OULED BEN ABDEL-KADER	SLY	01-23-11	30/03/74	348,2	33,4
			07/02/76	311,8	31,3
			02/03/79	703,8	28,5
ARIB EBDA	EBDA	01-18-01	30/03/74	277,2	20,5
			07/02/76	69,6	18,2
			02/03/79	329,4	33,2
BORDJ GHOBRINI	HACHEM	02-03-01	27/11/71	539,1	21,7
			07/02/76	89,0	17,6
			02/03/79	229,1	20,0
LAKHDARIA	ISSER	09-05-01	25/02/72	882,1	37,1
			30/03/74	4631,0	33,5
			07/02/76	1978,4	35,2
AIN CHARCHAR	KEBIR OUEST.	03-11-01	24-25/01/73	94,4	2,4
			27/03/73	39,3	2,0
			17-18/02/75	27,8	2,5
AIN EL ANCEL	KEBIR EST	03-16-01	24-25/01/73	302,6	7,8
			27/03/73	358,8	8,9
			18/11/76	249,0	9,4
CHOULY RN7	CHOULY	16-06-01	28-30/03/73	48,6	4,6
			29-31/03/74	14,0	3,1
			21-23/04/75	8,8	2,9

Les apports solides annuels étant constitués à 80% de crues de ce type, on peut s'attendre à une faible variabilité de la concentration moyenne à l'échelle annuelle.

L'examen du tableau 7 de l'annexe II qui donne les apports solides mensuels et annuels du bassin de l'oued ALLALAH et les concentrations correspondantes démontre une stabilité relative de la variable turbidité annuelle comparativement à celle du transport solide annuel.

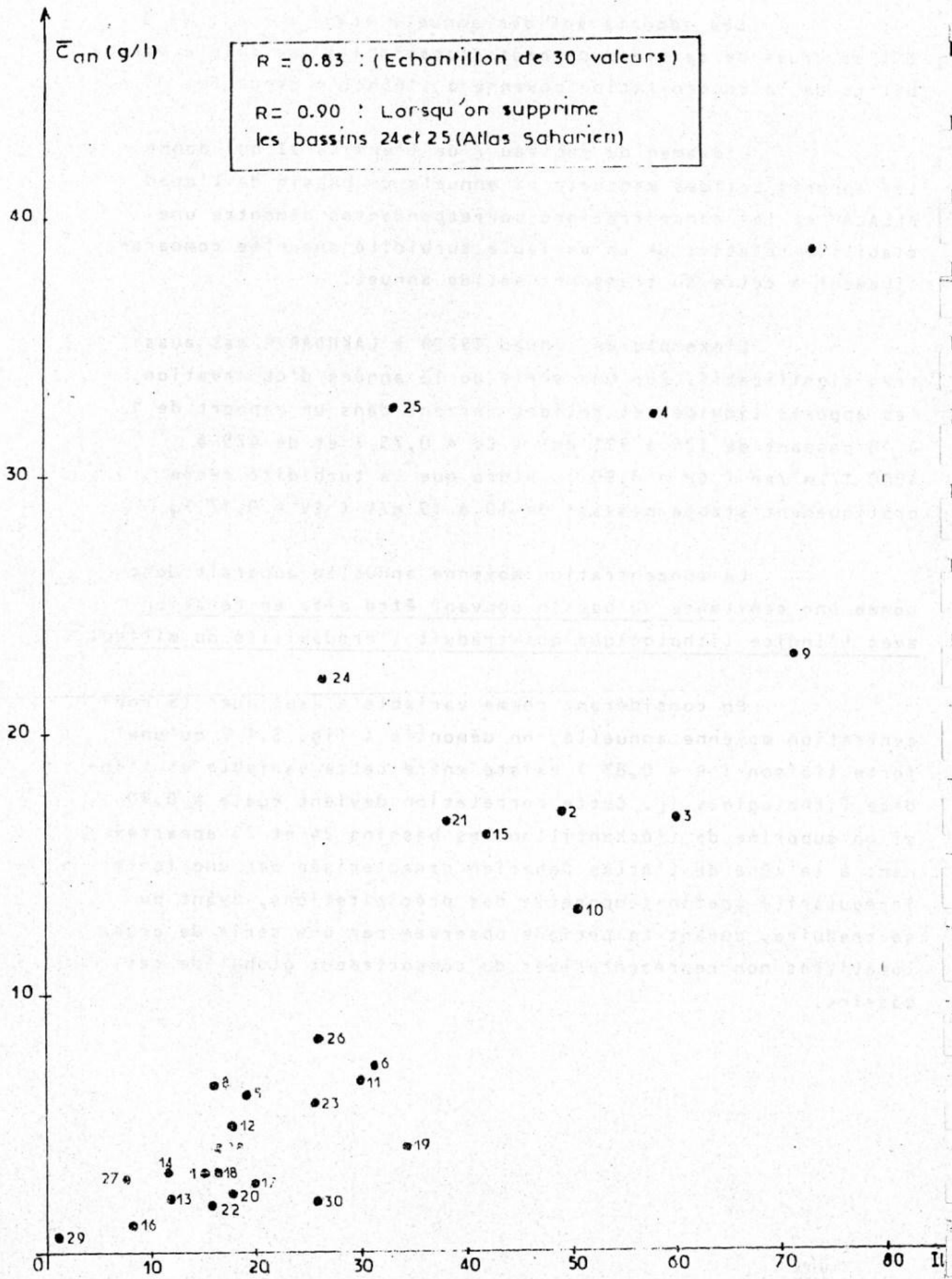
L'exemple de l'oued ISSER à LAKHDARIA est aussi très significatif. Sur une série de 13 années d'observation, les apports liquides et solides varient dans un rapport de 1 à 10 passant de 125 à 911 Hm^3 (CV = 0,75) et de 475 à 4000 $\text{T/km}^2/\text{an}$ (CV = 0,90), alors que la turbidité reste pratiquement stable passant de 10 à 19 g/l (CV = 0,12).

La concentration moyenne annuelle apparait donc comme une constante du bassin pouvant être mise en relation avec l'indice lithologique qui traduit l'érodabilité du milieu.

En considérant comme variable à expliquer la concentration moyenne annuelle, on démontre (fig. 3.1) qu'une forte liaison ($R = 0,83$) existe entre cette variable et l'indice lithologique I_L . Cette corrélation devient égale à 0.90 si on supprime de l'échantillon les bassins 24 et 25 appartenant à la zone de l'Atlas Saharien caractérisée par une forte irrégularité spatio-temporelle des précipitations, ayant pu se traduire, durant la période observée par une série de crues localisées non représentatives du comportement global de ces bassins.

FIG. 3.1 : CORRELATION LITHOLOGIE - CONCENTRATION MOYENNE ANNUELLE

$$\bar{C}_{an} = f(IL)$$



La figure 3.2 donne le graphique de corrélation entre les transports solides spécifiques moyens annuels et l'indice lithologique.

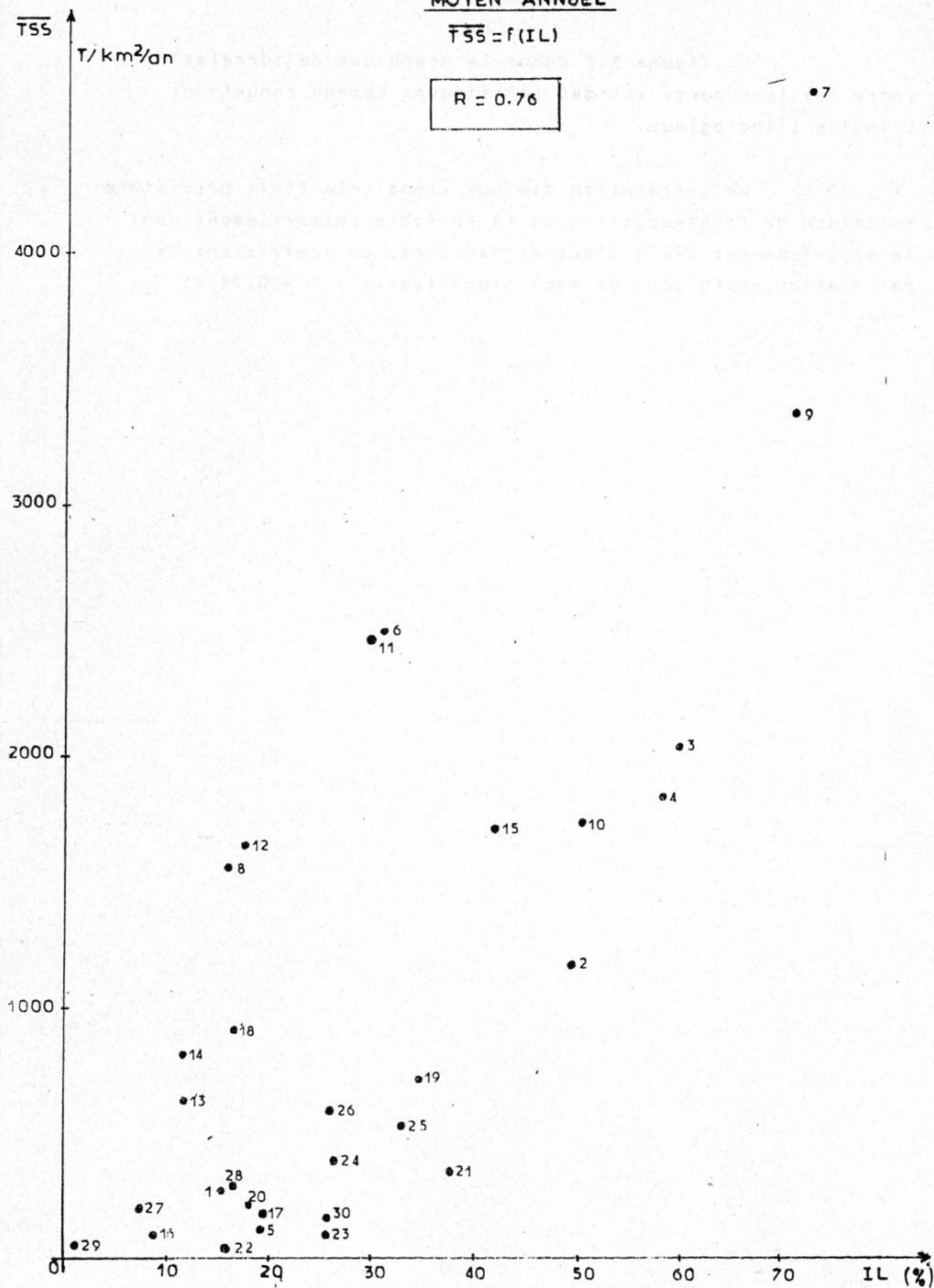
La corrélation diminue comme cela était prévisible en raison de l'introduction de la variable ruissellement dont le mécanisme est lié à d'autres facteurs. Le coefficient de corrélation reste tout de même significatif ($R = 0.76$).

FIG. 3.2: CORRELATION LITHOLOGIE-TRANSPORT SOLIDE SPECIFIQUE

MOYEN ANNUEL

$$\overline{TSS} = f(IL)$$

$$R = 0.76$$



II.- RECHERCHE D'UN INDICE DE PRECIPITATION SUSCEPTIBLE DE TRADUIRE LE RUISSELLEMENT ET L'EROSION :

2.1.- La pluie et l'érosion :

La pluie est le facteur actif de l'érosion des sols par l'eau. Elle constitue la source d'énergie nécessaire à l'arrachement des particules et leur transport.

Sur les versants peu inclinés et dans le cas de l'érosion en nappe, c'est l'énergie des gouttes de pluie qui est l'agent causal principal de l'érosion (ROOSE 1980), entraînant la destruction des agrégats, la formation d'une pellicule de battance, l'imperméabilisation du sol et la naissance du ruissellement. Celui-ci n'aurait pratiquement qu'un rôle de transport des particules détachées par la pluie.

Le rôle capital de l'énergie des gouttes de pluie a été démontré par différents auteurs et notamment par HUDSON en Rhodésie (1960/73), WISCHMEIER aux Etats Unies (1960), ROOSE en Afrique de l'Ouest (1980) qui démontre à l'échelle du champ que la pluie possède 256 fois plus d'énergie que le ruissellement.

Par contre, en zone méditerranéenne et semi-aride, sur les versants inclinés, où domine le ravinement et les sape-ments de berge, l'énergie du ruissellement devient la cause principale de l'érosion (HEUSCH 1970).

L'influence du ruissellement sur l'érosion et les transports solides a été mise en évidence sur l'exemple de l'oued ALLALAH.

Cependant le ruissellement n'est mesuré que sur un nombre limité de bassins, et notre objectif est de rechercher une relation valable sur l'ensemble du territoire. D'une façon générale, l'information pluviométrique est plus abondante que l'information hydrométrique, tant par le nombre d'observations que par la longueur des séries disponibles. Aussi nous rechercherons l'indice pluviométrique susceptible de traduire au mieux l'intensité du ruissellement et par suite de l'érosion.

2.2.- Définition d'un indice de précipitation en liaison avec le ruissellement et l'érosion à l'échelle du bassin versant :

Pour établir de manière satisfaisante les relations qui existent entre le transport solide spécifique annuel à l'exutoire des bassins étudiés et les caractéristiques des précipitations qui s'y produisent, nous avons procédé par approximations successives en utilisant différentes caractéristiques de précipitations sur des pas de temps de plus en plus courts.

Quelques indices de précipitations érosives définis antérieurement ont été mis à l'épreuve Algérienne. Les résultats obtenus à partir de l'exemple de l'oued ALLALAH ont servi d'exemple test.

De nombreux indices ont été proposés par différents auteurs à partir de différentes caractéristiques des précipitations :

- total précipité annuel ;
- répartition mensuelle et saisonnière des précipitations annuelles ;
- fréquence des précipitations journalières supérieures à un seuil donné ;
- intensité, énergie cinétique, agressivité des averses.

L'étude de l'oued ALLALAH nous a cependant confirmé l'inaptitude des indices calculés à partir des précipitations de courte durée pour décrire l'érosion à l'échelle du bassin versant (indice de WISCHMEIER par exemple).

D'autre part la détermination de tels indices est délicate et nécessite des données d'observation qui ne sont pas toujours disponibles.

Aussi, nous rechercherons des indices basés sur les précipitations journalières, ce pas de temps étant largement suffisant pour décrire le rôle des précipitations à l'échelle du bassin versant.

Les indices les plus significatifs seront mis en évidence par analyse en corrélation appliquée aux données annuelles du bassin de l'oued ALLALAH (tab. 3.3).

La généralisation se fera par la suite aux données moyennes annuelles des 30 bassins étudiés.

Les différents indices pluviométriques sont calculés à partir du réseau pluviométrique suivant : TAB.3.2. (chaque station est caractérisée par son code et son altitude).

TAB.3.2. LISTE DES STATIONS PLUVIOMETRIQUES UTILISEES :

N° BASSIN	POSTE N°1	ALTITUDE (m)	POSTE N°2	ALTITUDE(m)	POSTEN°3	ALTITUDE
1	01-16-05	1160	01-16-06	425		
2	01-19-03	220				
3	01-23-07	900	01-23-08	160		
4	01-26-05	140	01-25-03	790		
5	01-33-02	288				
6	01-18-03	850	01-18-01	280		
7	02-02-11	130				
8	02-03-04	420	02-03-03	170		
9	02-10-01	240	01-15-01	490		
10	02-10-14	400	02-10-15	520		
11	02-11-15	400	01-15-05	900		
12	02-14-27	130				
13	02-06-09	60				
14	02-19-03	251	02-19-01	550		
15	01-14-04	1000	09-03-04	370	09-02-01	790
16	03-11-06	93	03-11-02	50		
17	03-11-05	156				
18	03-16-02	150	03-16-01	32		
19	14-05-03	478	14-05-05	800		

.../...

N° BASSIN	POSTE N°1	ALTITUDE (m)	POSTE N°2	ALTITUDE(m)	POSTE N°3	ALTITUDE
20	14-06-06	100	14-04-03	185		
21	05-09-05	922	05-09-06	1060		
22	15-06-03	908				
23	15-07-22	740	15-07-07	980	15-07-06	1070
24	06-16-01	140	06-15-03	1451		
25	06-18-04	1459	06-18-05	590		
26	07-04-05	1640	07-04-03	1010		
27	07-07-04	1055				
28	04-01-01	76				
29	16-06-02	1100				
30	16-06-01	720	16-07-02	247		

2.2.1.- La pluviométrie annuelle :

En se basant sur la répartition pluviométrique annuelle de 40 bassins d'Algérie et de Tunisie TIXERONT (1960) différencie 3 zones :

- une zone où la pluviométrie, inférieure à 300 mm est insuffisante pour causer une érosion appréciable.

- une zone de 300 à 700 mm où l'érosion est très active ($TSS > 1200 \text{ t/km}^2/\text{an}$).

- une zone où la pluviométrie est supérieure à 700 mm qui bénéficie d'un couvert végétal protecteur ($TSS < 350 \text{ t/km}^2/\text{an}$).

TIXERONT admet que lorsque la pluie annuelle dépasse un certain taux, l'effet du substratum peut se trouver masqué par l'effet de la végétation qui assure une excellente protection quelle que soit la nature du terrain.

Nous constatons au contraire, à l'examen de nos données que la pluviométrie annuelle n'arrive pas à masquer l'effet du substratum lithologique. Sur au moins 5 bassins étudiés, recevant plus de 700 mm (Cotiers Algérois) le transport spécifique dépasse $1000 \text{ t/km}^2/\text{an}$. Par contre les bassins de la région "Cotiers Oranais, TAFNA", le transport solide est inférieur à $300 \text{ t/km}^2/\text{an}$ alors que la pluviométrie est comprise entre 300 et 700 mm.

Il a été démontré par différents auteurs que la pluviométrie annuelle ne peut contribuer à expliquer l'importance des transports solides que si on lui associe un indice susceptible de traduire la répartition annuelle des précipitations.

En Afrique du Nord, le contraste saisonnier est très marqué et contribue à accroître le pouvoir érosif des précipitations.

2.2.2.- L'indice de FOURNIER (1960) :

Cet indice a été établi à partir des valeurs de 104 bassins fluviaux de superficies supérieures à 2000 km^2 , appartenant à différentes régions du Globe. En essayant de traduire, d'une part, l'abondance pluviale, d'autre part le degré d'inégalité de la répartition des pluies dans l'année (concentration pluviale), FOURNIER met en évidence une relation entre l'érosion spécifique annuelle et un coefficient climatique p^2/P (rapport du carré de la pluviométrie du mois le plus humide, à la pluviométrie moyenne annuelle). Il montre ainsi qu'à l'échelle des grands bassins, les précipitations constituent bien le facteur prépondérant de l'érosion du sol.

Une analyse graphique de la dégradation spécifique en fonction de l'indice climatique, montre un regroupement des bassins étudiés autour de 4 droites de corrélation, suivant un

critère climatique et un critère orographique (h^2/S) (h étant la différence entre les altitudes moyennes et minimales du bassin exprimé en m et S la superficie en km^2). Le seuil orographique séparant les bassins à relief accentué, des bassins à relief peu accentué est défini par une valeur de $h^2/S = 6$.

La relation proposée par FOURNIER pour les bassins à relief accentué situés en zone semi-aride est de la forme :

$$DS = 91.78 p^2/P - 737.62.$$

Cette relation est valable pour $p^2/P > 8$.

Une autre relation de la forme :

$$DS = 52.49 p^2/P - 513.21$$

est proposée pour les régions à relief accentué situées sous climat non semi-aride (valable pour $p^2/P > 9.7$).

Une relation plus générale a été en outre proposée par FOURNIER sous la forme :

$$DS = \frac{1}{36} \left(\frac{p^2}{P} \right)^{2.65} \left(\frac{h^2}{S} \right)^{0.46}$$

Nous avons calculé l'indice climatique de FOURNIER sur les 30 bassins de notre étude qui, d'après le critère orographique défini, peuvent être classés comme bassins à relief accentué ($h^2/S > 6$).

En appliquant différents critères de définition des types bio-climatiques basés sur la pluviométrie et la température moyennes annuelles, nous constatons que les bassins étudiés appartiennent en majorité à la zone non semi-aride et obéissent donc à la deuxième relation proposée par FOURNIER.

Les 5 bassins susceptibles d'être classés comme appartenant à la zone semi-aride (régions HODNA, AURES, CHELIFF Occidental) sortent pratiquement des limites de validité des relations de FOURNIER ($p^2/P < 8$).

L'application des différentes relations de FOURNIER sur les bassins d'Algérie donnent des résultats très peu satisfaisants.

Les valeurs simulées sont largement sous-estimées sur la majorité des bassins, et notamment sur les bassins du CHELIFF et des Cotiers Algérois particulièrement érodables. Par contre, les valeurs simulées sur les bassins lithologiquement peu susceptibles à l'érosion (TAFNA par exemple) semblent sur-estimées.

L'application de ces relations au Maroc (HEUSCH 1970) n'avait donnée des résultats jugés satisfaisants que moyennant une pondération par un coefficient lithologique.

L'intérêt de la relation de FOURNIER, basée sur des données généralement disponibles, réside dans la simplicité de son calcul et son aptitude à traduire en partie le contraste saisonnier des précipitations. Ce contraste très marqué en Afrique du Nord, contribue fortement à accroître le pouvoir érosif des précipitations. Cependant elle ne prend pas en charge l'ensemble des facteurs mis en jeu, et notamment le facteur lithologique qui est à notre avis le facteur prépondérant.

2.2.3.- L'indice d'ARNOLDUS :

ARNOLDUS (1978) reprend l'indice de FOURNIER et le modifie de manière à englober les précipitations mensuelles de tous les mois, sans se limiter au mois de pluviométrie maximale.

Cet indice se calcule par la relation :

$$I A = \frac{\sum_{i=1}^{12} p_i^2}{P} / P$$

p_i = pluviométrie moyenne mensuelle

P = Pluviométrie moyenne annuelle.

Les tests de corrélation appliqués aux apports solides spécifiques annuels observés sur l'oued ALLALAH de 1972 à 1980 (TAB. 3.3) montrent effectivement une amélioration de la corrélation qui passe de 0,79 (indice de FOURNIER) à 0,86 (indice d'ARNOLDUS).

2.2.4.- Calcul d'un indice basé sur les précipitations journalières :

L'amélioration de cette corrélation nécessite de passer à un pas de temps plus court. L'utilisation des précipitations journalières; information disponible sur l'ensemble du territoire, nous paraît être appropriée.

L'exemple de l'oued ALLALAH a mis en évidence l'existence d'un seuil de précipitation au dessous duquel le ruissellement et par suite l'érosion restent insignifiants même si le bassin est saturé.

80% des apports solides sont dûs à la contribution des crues provoquées par des précipitations supérieures à 30 mm.

En mettant en corrélation la somme des précipitations supérieures à ce seuil avec les transports solides spécifiques annuels observés à SIDI AKACHA, on constate une amélioration de la corrélation ($R = 0,89$) par rapport à celles obtenues précédemment.

2.2.4.- Indice d'agressivité de DEFFONTAINES :

Dans une étude de l'érosion en "Moyen-Vivarais" (Ardèche) DEFFONTAINES et MONTARD (1968) ont estimé que les "risques d'érosion sont élevés pour des précipitations journalières supérieures à 40 mm". Ils ont établi un indice prenant en compte les précipitations tombées sous forme de pluies journalières supérieures à 40 mm :

$$i = b . c$$

où b est le nombre de jours de précipitations supérieures à 40 mm, et c, le pourcentage des précipitations mensuelles tombées sous forme de précipitations journalières supérieures à 40 mm.

Nous calculerons cet indice année par année sur le bassin de l'oued ALLALAH à partir des données de pluies journalières supérieures à 30 mm calculées précédemment.

Une légère modification de la définition des composantes de cet indice a été apportée comme suit :

b = nombre annuel des précipitations journalières supérieures à 30 mm.

c = % des précipitations annuelles tombées sous forme de pluies journalières supérieures à 30 mm.

Une corrélation très significative caractérisée par un coefficient $R = 0,93$ est obtenue entre l'indice pluviométrique ainsi calculé et le transport solide spécifique annuel à SIDI AKACHA.

L'indice de DEFFONTAINES apparaît donc comme un indice efficace capable de traduire correctement le ruissellement et l'érosion à l'échelle du bassin versant.



Le tab. 3.3. ci-dessous résume cette analyse et met en évidence la progression de la liaison entre l'indice pluviométrique et l'érosion lorsqu'on passe^{de} la pluie annuelle ($R = 0,75$) à l'indice de DEFFONTAINES ($0,93$).

Tab. 3.3. : CALCUL DES DIFFERENTS INDICES DES PRECIPITATIONS ET TESTS DE CORRELATION (EXEMPLE DE L'OUED ALLALAH).

ANNEE	P_{an}	IF (FOURNIER)	IA (ARNOLDUS)	$\sum P_J > 30$	ID DEFFONTAINES	TSS (T/km ² /an)
72/73	501,8	36,1	94,7	72,4	29	3354,3
73/74	708,9	40,4	106,6	290,8	246	7665,2
74/75	488,7	40,4	91,9	63,0	26	833,2
75/76	727,3	50,2	127,5	287,0	276	7198,2
76/77	559,0	19,4	80,4	152,2	109	916,9
77/78	521,9	35,2	93,5	155,1	89	1508,72
78/79	626,7	58,7	134,0	387,7	438	11100,1
79/80	583,0	32,2	84,1	162,0	139	4553,3
R	0,75	0,79	0,86	0,89	0,93	

La généralisation de cette analyse aux 30 bassins de l'étude (tab. 3.4.1 et 3.4.2) confirme cette tendance. Les transports solides spécifiques moyens annuels sont mis en corrélation avec les valeurs moyennes des différents indices pluviométriques calculés précédemment.

La progression du coefficient de corrélation est maintenue dans l'ensemble, lorsqu'on passe de la pluviométrie moyenne annuelle à l'indice de DEFFONTAINES.

On observe cependant une baisse de corrélation pour l'indice calculé par sommation des précipitations journalières supérieures à 30 mm.

Les seuils de ruissellement peuvent varier en fonction de la perméabilité des bassins. Nous considérons que les bassins franchement imperméables constitués à plus de 50% de marnes et d'argiles peuvent réagir à des précipitations inférieures à 30 mm.

L'indice pluviométrique a été recalculé en considérant un seuil variable en fonction des conditions lithologiques des bassins :

- Bassins imperméables (IL >50%) : $s = 20$ mm.
- Bassins moyennement perméables (IL <50%) : $s = 30$ mm.

En recalculant l'indice pluviométrique, compte tenu de ce nouveau critère, on améliore sensiblement la signification de cet indice.

L'examen des tableau 3.3. et 3.4. et/la fig.3.3^{de} montre que l'indice de DEFFONTAINES calculé à partir de précipitations journalières supérieures à un seuil variable (en fonction de la lithologie des bassins) traduit au mieux l'influence des précipitations et du ruissellement sur l'érosion et les transports solides.

TA3.3.4.1.- RECHERCHE D'UN INDICE DE PRECIPITATION.

REGRESSION MULTIPLE

$$TSS = f(\bar{P}, IF, IA, \sum P_{30}, \sum P_{50})$$

VARIABLE	1	PLUIE MOYENNE	:PMOY
VARIABLE	2	INDICE DE FOURNIER	:IF
VARIABLE	3	INDICE D'ARNOLDUS	:IA
VARIABLE	4	SOMME DES PLUIES >30 MM	:P>30
VARIABLE	5	SOMME DES PLUIES >50	:P>50
VARIABLE	6	INDICE DE DEFFONTAINES	:ID

VARIABLE DEPENDANTE : TRANSPORT SOLIDE SPECIFIQUE : TSS

MATRICE

	1	2	3	4	5	6	7
563.30	13.29	59.68	107.20	107.00	63.00	273.40	
417.40	13.74	59.03	80.40	80.40	39.00	1151.10	
457.30	15.56	59.62	86.40	159.50	234.00	2037.30	
375.20	12.12	50.82	43.60	124.70	116.00	1821.70	
305.40	7.84	35.54	22.40	22.40	3.00	103.40	
737.20	27.54	104.99	192.20	192.20	93.00	2492.90	
599.40	14.31	71.55	124.80	274.80	352.00	4553.80	
631.00	14.78	75.72	301.10	301.10	250.00	1542.10	
652.00	27.56	92.22	231.60	364.40	463.00	3353.50	
581.60	19.67	73.80	121.70	195.00	188.00	1729.60	
370.70	4.95	132.50	443.50	443.50	356.00	2461.20	
829.70	23.27	97.97	325.50	325.50	255.00	1630.30	
851.60	30.64	100.14	277.60	277.60	104.00	639.70	
782.00	24.62	86.02	206.40	206.40	96.00	905.60	
466.00	15.88	58.73	88.80	88.80	41.00	1711.60	
602.00	16.76	75.49	124.80	124.80	71.00	91.60	
594.50	11.81	63.11	143.40	143.40	75.00	197.50	
863.60	27.64	106.88	298.20	298.20	172.00	900.30	
559.10	18.90	77.58	142.20	142.20	73.00	712.90	
601.40	12.85	64.15	104.10	104.10	34.00	214.10	
314.00	7.23	38.61	26.80	26.80	5.00	344.80	
322.00	11.67	35.01	37.70	37.70	20.00	35.70	
398.00	12.62	53.78	90.30	90.30	27.00	92.10	
393.30	5.54	28.12	75.40	75.40	34.00	401.20	
340.20	4.74	27.55	48.10	48.10	28.00	509.10	
420.40	9.09	41.12	91.00	91.00	43.00	303.60	
452.30	8.37	44.05	52.60	52.60	14.00	195.70	
471.70	14.98	60.30	176.20	176.20	122.00	294.30	
542.10	17.16	61.97	91.20	91.20	30.00	75.20	
436.60	18.40	62.66	95.40	95.40	44.00	113.50	

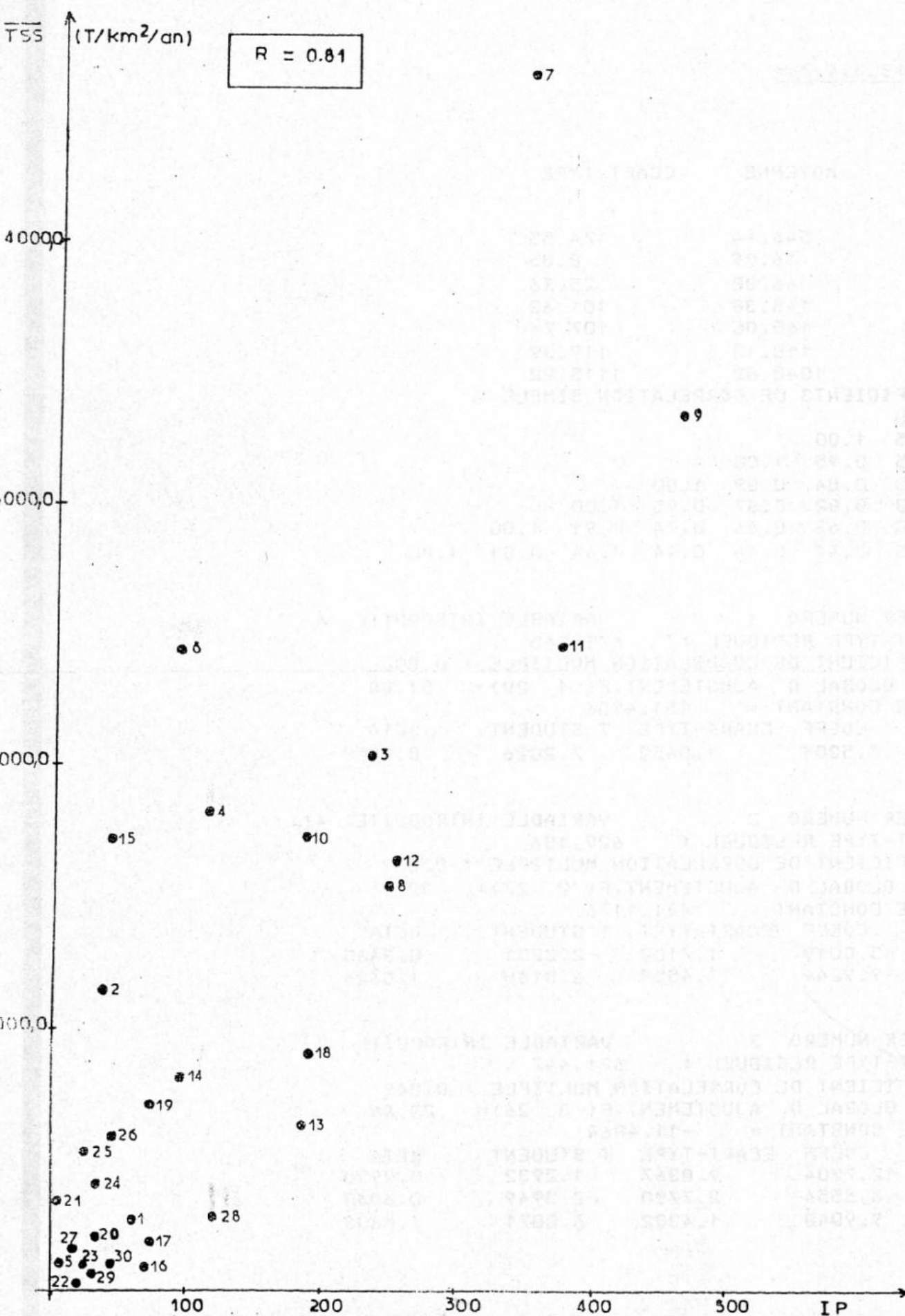
6 7.5287

PALIER NUMERO
ECART-TYPE RE
COEFFICIENT I
TEST GLOBAL. I
TERME CONSTAN
VAR COEFF
4 -3.8019
6 9.9244

PALIER NUMERO
ECART-TYPE RE
COEFFICIENT I
TEST GLOBAL. I
TERME CONSTAN

LE TRANSPORT SOLIDE SPECIFIQUE MOYEN ANNUEL

$$\overline{TSS} = f(IP)$$



III.- MISE AU POINT D'UNE RELATION STATISTIQUE ENTRE TRANSPORTS SOLIDES SPECIFIQUES MOYENS ET PARAMETRES PHYSICO-CLIMATIQUES DES BASSINS :

3.1.- Introduction de la lithologie et des précipitations érosives :

Les tableaux 3.5.1 et 3.5.2 donnent les résultats d'une analyse en régression multiple, basée sur les 30 bassins étudiés, mettant en corrélation les transports solides spécifiques moyens : TSS ($T/km^2/an$) calculés sur la période 72/79 et les indices lithologique (IL) et pluviométrique (IP) définis précédemment comme étant les meilleurs indicateurs des transports solides.

La première variable sélectionnée (IP) donne une corrélation égale à 0,806. L'introduction de la variable (IL) améliore le coefficient de corrélation multiples qui passe à 0,908.

L'examen du tableau 3.5.2 qui donne les écarts relatifs entre valeurs observées et mesurées montre que les 15 premiers bassins (Région CHELIFF et Cotiers ALGEROIS) sont correctement simulés dans l'ensemble (pour la majorité des bassins, l'écart est inférieur à 30%). Par contre, des écarts importants apparaissent sur 9 bassins (16, 17, 21, 22, 23, 27, 28, 29, 30) appartenant à la 2ème série. Ces écarts ne semblent pas aléatoirement distribués.

Les 2 plus mauvaises simulations (valeurs estimées négatives) concernent les bassins 27 (FOUM EL GUEISS AMONT) et 29 (CHOULY) dont les indices lithologiques (pourcentage de formations marneuses érodables) sont inférieurs à 10%.

Les écarts observés sur les bassins 16 et 17 (Cotiers CONSTANTINOIS) étaient prévisibles. La période 72/79,

a été particulièrement sèche dans cette région et la moyenne calculée sur cette période n'est pas représentative de la moyenne longue durée.

Nous disposons à la station de AIN CHARCHAR, d'une série de 15 années de mesure (1952/61 et 72/79). Le transport solide spécifique moyen annuel observé sur cette période est de $140 \text{ T/km}^2/\text{an}$. Avec la correction d'échantillonnage, les valeurs simulées pour les 2 bassins de cette région paraissent alors satisfaisantes, compte tenu des erreurs aléatoires.

Les 5 autres bassins mal simulés (21, 22, 23, 28, 30) se repartissent régionalement suivant 2 zones distinctes.

Les 3 premiers appartiennent à la zone "HAUTES PLAINES SETIFIENNE, HODNA" caractérisée par une faible pluviométrie (300 mm), une lame écoulée d'environ 20 mm et des coefficients d'écoulement intérieurs à 7%.

Les deux derniers appartiennent à la zone "TAFNA-COTIERS ORANAIS" constituée essentiellement de formations résistantes dominées par les calcaires dolomitiques du jurassique, très perméables.

Les phénomènes de karstification qui donnent à ces bassins des limites différentes de leurs limites topographiques constituent une source d'erreur supplémentaire.

TAB. 3.5.1.- REGRESSION MULTIPLE

$$TSS = f (IL, IP).$$

VARIABLE 1 INDICE LITHOLOGIQUE =IL

VARIABLE 2 INDICE DE DEFFONTAINES =IP

VARIABLE DEPENDANTE :TRANSPORT SOLIDE SPECIFIQUE =TSS

MATRICE

1	2	3
15.30	63.00	273.40
49.70	39.00	1151.10
60.00	234.00	2037.30
58.00	116.00	1821.70
19.30	3.00	103.40
31.00	93.00	2492.90
73.00	352.00	4653.80
16.00	250.00	1542.10
71.30	463.00	3353.50
50.30	188.00	1728.60
30.00	356.00	2461.30
17.70	255.00	1630.30
12.00	184.00	639.70
11.80	96.00	805.60
42.00	41.00	1711.60
8.30	71.00	91.60
19.30	75.00	197.50
16.70	192.00	903.30
34.70	75.00	714.90
18.00	34.00	214.10
37.90	5.00	344.80
15.90	20.00	35.70
25.70	27.00	99.10
26.40	34.00	401.20
33.00	25.00	539.10
26.00	43.00	593.60
7.50	14.00	196.70
16.50	122.00	294.90
1.00	30.00	75.20
26.00	44.00	116.50

I MOYENNE ECART-TYPE

1	29.01	18.83
2	118.13	119.39
3	1040.02	1115.22

COEFFICIENTS DE CORRELATION SIMPLE

1.00	
0.49	1.00

TAB. 3.5.2.-

PALIER NUMERO 1 VARIABLE INTRODUITE 2
 ECART-TYPE RESIDUEL : 671.964
 COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE : 0.806
 TEST GLOBAL D AJUSTEMENT, $F(1, 28) = 51.88$
 TERME CONSTANT = 151.4953
 VAR COEFF ECART-TYPE T STUDENT BETA
 2 7.5281 1.0452 7.2026 0.8059

PALIER NUMERO 2 VARIABLE INTRODUITE 1
 ECART-TYPE RESIDUEL : 484.564
 COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE : 0.908
 TEST GLOBAL D AJUSTEMENT, $F(2, 27) = 63.30$
 TERME CONSTANT = -413.1046

VAR COEFF ECART-TYPE T STUDENT BETA
 1 28.4278 5.4867 5.1813 0.4799
 2 5.3265 0.8652 6.1561 0.5702

OBS	MESUREE	ESTIMEE	DIFFERENCE	ECART RELATIF
1	273.40	357.41	-84.01	-0.31
2	1151.10	1207.49	-56.39	-0.05
3	2037.30	2538.95	-501.65	-0.25
4	1821.70	1853.57	-31.87	-0.02
5	103.40	151.53	-48.13	-0.47
6	2492.90	963.52	1529.38	0.61
7	4653.80	3537.03	1116.76	0.24
8	1542.10	1373.35	168.75	0.11
9	3353.50	4079.94	-726.44	-0.22
10	1728.60	2018.18	-289.58	-0.17
11	2461.30	2335.95	125.35	0.05
12	1630.30	1448.31	181.99	0.11
13	639.70	908.10	-268.40	-0.42
14	805.60	433.68	371.92	0.46
15	1711.60	999.25	712.35	0.42
16	91.60	201.02	-109.42	-1.19
17	197.50	535.04	-337.54	-1.71
18	903.30	1084.32	-181.02	-0.20
19	714.90	972.82	-257.92	-0.36
20	214.10	279.69	-65.59	-0.31
21	344.80	690.94	-346.14	-1.00
22	35.70	145.43	-109.73	-3.07
23	99.10	461.30	-362.20	-3.65
24	401.20	518.49	-117.29	-0.29
25	539.10	658.17	-119.07	-0.22
26	523.60	555.05	38.55	0.06
27	196.70	125.33	322.03	1.64
28	294.90	705.78	-410.88	-1.39
29	75.20	224.88	300.08	3.99
30	116.50	560.38	-443.88	-3.81
ECART QUADRATIQUE MOYEN :			459.69702	

3.2.- Analyse des résidus :

Pour essayer d'expliquer les écarts observés lors de cette première analyse, un deuxième essai de corrélation multiple est effectué en prenant comme variable à expliquer les écarts entre valeurs observées et simulées et comme variables explicatives les caractéristiques physico-climatiques calculées (S , \bar{H} , DS , h^2/S , CT , \bar{P}) non prises en compte lors du 1er essai.

Le résultat de ce test est illustré par les tableaux 3.6.1 et 3.6.2, il met en évidence une corrélation non négligeable entre les résidus de la première regression et le coefficient de torrentialité, variable géomorphologique qui traduit l'intensité de chevelu hydrographique.

TAB. 3.6.1.- ANALYSE DES RESIDUS.

REGRESSION MULTIPLE

VARIABLE	1	SUPERFICIE	:S
VARIABLE	2	ALTITUDE	:HMOY
VARIABLE	3	DENIVELEE SPECIFIQUE	:DS
VARIABLE	4	COEFF. OROGRAPHIQUE DE FOURNIER	:H2/S
VARIABLE	5	COEFF. DE TORRENTIALITE	:CT
VARIABLE	6	PLUIE MOYENNE	:PMOY
VARIABLE DEPENDANTE		:ECART RELATIF	:ECR

MATRICE

1	2	3	4	5	6	7
500.00	1024.00	417.40	570.30	17.80	563.60	0.31
865.00	631.00	449.20	86.20	25.40	417.40	0.05
1225.00	717.00	283.50	253.30	63.20	457.60	0.25
1890.00	665.00	190.00	145.80	45.60	375.20	0.02
470.00	592.00	274.50	286.60	13.30	305.40	0.47
270.00	736.00	304.20	787.10	94.60	737.20	0.61
295.00	317.00	260.10	190.40	24.00	599.40	0.24
215.00	386.00	431.40	649.70	27.30	631.00	0.11
215.00	508.00	128.60	700.20	22.00	652.00	0.22
395.00	513.00	290.20	431.80	16.00	581.60	0.17
316.00	833.00	396.20	933.10	30.00	870.70	0.05
387.00	830.00	455.20	1170.40	69.20	829.70	0.11
93.00	466.00	317.80	1772.40	46.10	851.60	0.42
300.00	625.00	594.20	1008.30	6.70	782.00	0.46
3615.00	750.00	251.00	120.50	29.50	466.00	0.42
1130.00	278.00	344.90	56.70	12.20	602.00	1.19
485.00	376.00	339.00	219.10	15.10	594.50	1.71
680.00	398.00	386.10	199.20	16.30	863.60	0.20
550.00	641.00	407.00	542.00	25.20	558.10	0.36
103.00	305.00	478.80	606.80	17.40	601.40	0.31
1330.00	1080.00	339.70	147.60	25.20	314.00	1.00
176.00	1153.00	279.40	1115.10	6.00	322.00	3.07
2350.00	1000.00	263.90	28.80	17.80	398.00	3.65
1050.00	1490.00	449.80	1360.00	39.90	298.80	0.29
2085.00	1105.00	415.90	401.60	36.40	340.20	0.22
296.00	1420.00	397.90	540.50	7.30	420.40	0.06
144.00	1305.00	454.70	733.50	12.20	459.30	1.64
100.00	364.00	384.20	894.00	12.10	471.70	1.39
170.00	1235.00	271.60	1530.00	21.60	542.10	3.99
1935.00	720.00	377.10	208.40	11.10	486.60	3.81

TAS. .6. .-

I	MOYENNE	ECART-TYPE
1	787.83	839.70
2	74874.67	34804.45
3	354.45	96.84
4	509.65	465.39
5	26.88	20.08
6	546.44	174.55
7	0.89	1.19

COEFFICIENTS DE CORRELATION SIMPLE

1.00							
0.15	1.00						
-0.25	0.12	1.00					
-0.54	0.29	0.21	1.00				
0.07	0.03	-0.14	0.20	1.00			
-0.41	-0.47	0.20	0.33	0.24	1.00		
0.14	0.26	-0.19	0.08	-0.32	-0.26	1.00	

3.3.- Introduction de la variable CT :

Le coefficient de torrentialité (CT) est un paramètre morphologique, mis au point par les géographes Américains SCHUM et HORTON, et le "Centre de Géographie Appliquée" de STRASBOURG (HIRSCH, 1962).

Il est égal au produit de la densité de drainage (D_d) par la fréquence des thalwegs d'ordre 1.

$$CT = D_d \cdot F_I = \frac{\sum L_x}{A} \cdot \frac{N1}{A}$$

La valeur de ce paramètre dépend essentiellement du nombre et de la longueur des thalwegs d'ordre 1 (thalwegs élémentaires). Il traduit par conséquent l'intensité de la dissection d'un bassin.

A la suite des travaux de CAPOLINI (1965/70) sur la géomorphologie et l'érosion dans le bassin du CHELIF, on pensait pouvoir corréler ce paramètre avec quelque précision, avec l'érosion spécifique des bassins, et l'utiliser pour prévoir les débits solides et délimiter les zones d'érodabilité. Le manque de fiabilité des données sur les transports solides n'avait pas permis alors de tirer des conclusions nettes.

Les études géomorphologiques entreprises ultérieurement (HUSSON, 1975) à partir de la cartographie de ce paramètre sur quelques bassins des COTIERS ALGEROIS et du HODNA ont mis en évidence une certaine correspondance entre les fortes valeurs de CT et les zones dominées par le ravinement hiérarchisé et les bad-lands.

Par contre le CT s'avère totalement incapable de préciser les secteurs affectés par les mouvements de masse, la solifluxion ou les sapements de berge. Or ces processus sont à l'origine d'un apport considérable de matériel dans les oueds.

En outre, le manque de fiabilité dans le calcul du CT constitue un handicap majeur : il est extrêmement délicat de dresser un chevelu hydrographique complet et exact. Les documents de base (cartes topographiques au 1/50.000) peuvent manquer d'unité dans la précision offerte.

Le paramètre est essentiellement conditionné par la longueur et la fréquence des thalwegs d'ordre 1 dont la détermination est généralement obtenue par extrapolation statistique.

Cette absence de précision dans le calcul de ce paramètre, interdit de le considérer en fonction de sa valeur absolue. Cependant son intérêt comme intégrateur de la physiographie d'un bassin et comme indice pouvant servir à la classification des bassins, et faciliter leur étude analogique a largement été démontrée.

La fig. 3.4 montre qu'une corrélation non négligeable existe entre le coefficient de torrentialité et les transports solides spécifiques des 30 bassins de notre étude ($R = 0,42$).

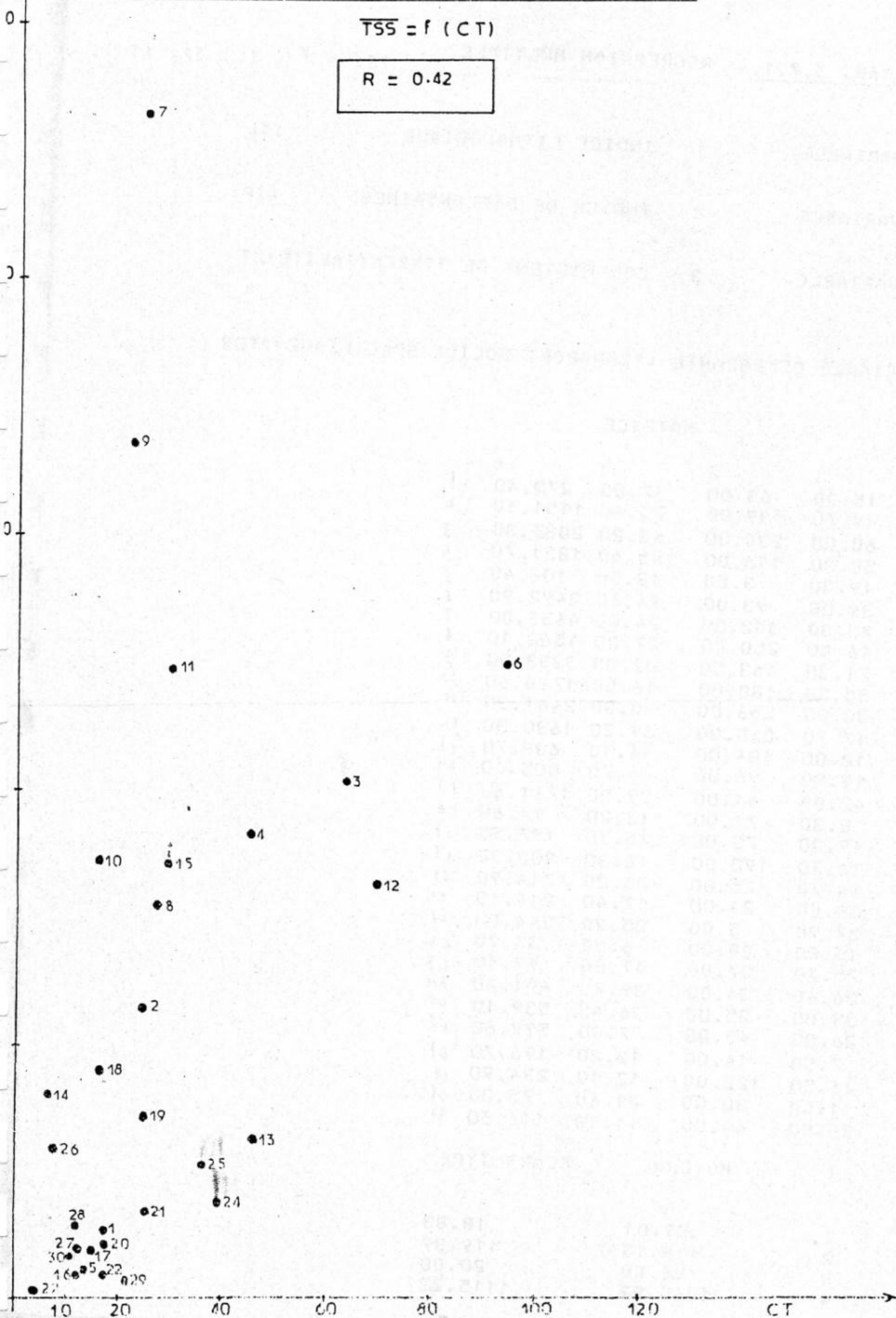
L'introduction de la variable CT dans la régression multiple $TSS = f(IL, IP)$ donne des résultats satisfaisants. Les tableaux 3.7.1 et 3.7.2 et la fig. 3.5 montrent une amélioration de la corrélation multiple dont le coefficient passe de 0,906 à 0,923 avec l'introduction de ce paramètre.

Ce coefficient complète par conséquent les facteurs principaux (lithologie, précipitations) en donnant une image réelle de la dissection actuelle des bassins qui peut être liée à des facteurs anthropiques non prises en compte par les variables précédentes.

La simulation des données observées est sensiblement améliorée. Les écarts relatifs des bassins 16, 18, 20 et 28 diminuent.

Il subsiste cependant des écarts importants pour les bassins 22, 23, 27, 29, 30. Ces bassins semblent sortir du domaine de validité de notre modèle.

FIG.3.4 : CORRELATION ENTRE LE COEFFICIENT DE TORRENTIALITE ET LE
 TRANSPORT SOLIDE SPECIFIQUE MOYEN ANNUEL



TAB. 3.7.1.- REGRESSION MULTIPLE

$$TSS = f (IL, IP, CT).$$

VARIABLE	1	INDICE LITHOLOGIQUE	:IL
VARIABLE	2	INDICE DE DEFFONTAINES	:IP
VARIABLE	3	COEFFICIENT DE TORRENTIALITE	:CT

VARIABLE DEPENDANTE :TRANSPORT SOLIDE SPECIFIQUE :TSS

MATRICE

1	2	3	4	
15.30	63.00	17.80	273.40	1
49.70	39.00	25.40	1151.10	2
60.00	234.00	63.20	2037.30	3
58.00	116.00	45.60	1821.70	4
19.30	3.00	13.30	103.40	5
31.00	93.00	94.60	2492.90	6
73.00	352.00	24.00	4653.80	7
16.00	250.00	27.30	1542.10	8
71.30	463.00	22.00	3353.50	9
50.30	188.00	16.00	1728.60	10
30.00	356.00	30.00	2461.30	11
17.70	255.00	69.20	1630.30	12
12.00	184.00	46.10	639.70	13
11.80	96.00	6.70	805.60	14
42.00	41.00	29.50	1711.60	15
8.30	71.00	12.20	91.60	16
19.30	75.00	15.10	197.50	17
16.70	192.00	16.30	903.30	18
34.70	75.00	25.20	714.90	19
18.00	34.00	17.40	214.10	20
37.90	5.00	25.20	344.80	21
15.90	20.00	6.00	35.70	22
25.70	27.00	17.80	99.10	23
26.40	34.00	39.90	401.20	24
33.00	25.00	36.40	539.10	25
26.00	43.00	7.30	593.60	26
7.50	14.00	12.20	196.70	27
16.50	122.00	12.10	294.90	28
1.00	30.00	21.60	75.20	29
26.00	44.00	11.10	116.50	30

I	MOYENNE	ECART-TYPE
1	29.01	18.83
2	118.13	119.39
3	26.88	20.08
4	1040.82	1115.22

TAB. 3.7.2.-

COEFFICIENTS DE CORRELATION SIMPLE

1.00

0.49 1.00

0.25 0.24 1.00

0.76 0.91 0.42 1.00

PALIER NUMERO 1 VARIABLE INTRODUITE 2

ECART-TYPE RESIDUEL : 671.934

COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE : 0.806

TEST GLOBAL D'AJUSTEMENT, F(1 28) = 51.88

TERME CONSTANT = 151.4953

VAR	COEFF	ECART-TYPE	T STUDENT	BETA
2	7.5281	1.0452	7.2026	0.8059

PALIER NUMERO 2 VARIABLE INTRODUITE 1

ECART-TYPE RESIDUEL : 484.564

COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE : 0.908

TEST GLOBAL D'AJUSTEMENT, F(2 27) = 63.30

TERME CONSTANT = -413.1046

VAR	COEFF	ECART-TYPE	T STUDENT	BETA
1	28.4278	5.4867	5.1813	0.4799
2	5.3265	0.8652	6.1561	0.5702

PALIER NUMERO 3 VARIABLE INTRODUITE 3

ECART-TYPE RESIDUEL : 452.003

COEFFICIENT DE CORRELATION MULTIPLE : 0.923

TEST GLOBAL D'AJUSTEMENT, F(3 26) = 50.18

TERME CONSTANT = -593.5607

VAR	COEFF	ECART-TYPE	T STUDENT	BETA
1	26.6180	5.1812	5.1374	0.4494
2	5.0746	0.8149	6.2275	0.5432
3	9.7724	4.3572	2.2428	0.1760

OBS	MESUREE	ESTIMEE	DIFFERENCE	ECART RELATIF
1	273.40	307.34	-33.94	-0.12
2	1151.10	1175.48	-24.38	-0.02
3	2037.30	2008.58	287.72	0.14
4	1824.70	1994.35	-169.65	-0.09
5	103.40	65.36	38.04	0.37
6	2492.90	1628.00	864.90	0.35
7	4653.00	3370.34	1282.66	0.28
8	1542.10	1367.76	174.34	0.11
9	3053.50	3868.82	-815.32	-0.15
10	1728.60	1855.70	-127.10	-0.07
11	2461.30	2304.70	156.60	0.06
12	1630.30	1847.84	-217.54	-0.13
13	639.70	1110.08	-470.38	-0.74
14	805.60	273.17	532.43	0.66
15	1711.60	1020.74	690.86	0.40
16	21.60	106.89	-85.29	-0.47
17	177.50	448.32	-270.82	-0.27
18	900.30	994.57	-94.27	-0.09
19	714.70	956.94	-242.24	-0.34
20	214.10	229.14	-15.04	-0.07
21	344.80	686.90	-342.10	-0.99
22	35.70	-10.21	45.91	1.29
23	92.10	401.48	-309.38	-3.36
24	401.20	671.61	-270.41	-0.67
25	502.10	747.41	-245.31	-0.49
26	590.60	389.05	201.55	0.34
27	196.70	-200.66	397.36	2.02
28	274.70	582.90	-308.20	-1.12
29	75.20	-200.62	275.82	3.67
30	116.50	430.26	-313.76	-2.69
ECART QUADRATIQUE MOYEN :			420.79102	

FIG. 3.0 : TEST D'AJUSTEMENT DE LA REGRESSION:
CORRELATION ENTRE VALEURS OBSERVEES
ET VALEURS SIMULEES PAR LA
REGRESSION

REGRESSION

●7

+7

+9

→ Intervalles de confiance à 80%

●11

+3

+4

+2

+10

+4

+12

+10

+12

+10

+12

+10

+12

+10

+12

+10

+12

+10

+12

+10

+12

+10

+12

+10

+12

●6

+15

+15

+15

+15

+15

+15

+15

+15

+15

+15

+15

+15

+15

+15

+15

+15

+15

+15

+15

+15

+21

+25

+19

+13

+26

+24

+25

+21

+6

+11

+6

+11

+6

+11

+6

+11

+6

+11

+6

+11

+6

+11

+6

+11

+6

+11

+6

+11

+6

+11

+6

+11

+6

+11

Corrélation TSS = $f(IL)$
Corrélation TSS = $f(IL, IP, CT)$
 $R = 0,923$

Valeurs observées ($T/Km^2/an$)

Valeurs calculées
($T/Km^2/an$)

3000,0

2000,0

1000,0

C O N C L U S I O N :

La lithologie, le pourcentage et la fréquence des précipitations journalières supérieures à un seuil donné, la densité du réseau hydrographique sont les facteurs principaux de l'érosion à l'échelle d'un bassin versant. Leur utilisation en prévision présente un intérêt évident dans la mesure où ils sont disponibles en n'importe quel point du territoire.

Un handicap peut se présenter au niveau de l'interprétation des cartes géologiques, pour l'estimation de l'érodabilité d'une formation lithologique donnée. Des contrôles de terrain permettent cependant de limiter les erreurs.

L'utilisation d'un indice de précipitation peut aussi comporter des risques d'erreur. Les statistiques portent sur des pluies ponctuelles plus ou moins représentatives de la pluviométrie moyenne du bassin.

Des précipitations intenses mais localisées peuvent entraîner des débits solides importants sans être enregistrées à la station de mesure.

Un tel risque est important dans la zone des hautes plaines ou de l'Atlas Saharien où les précipitations orageuses d'Automne et d'Eté peuvent entraîner des ruissellements intenses. Les moyennes annuelles n'ont aucune signification dans ces régions.

Par contre sur les bassins de l'Atlas Tellien, il est rare qu'une précipitation journalière supérieure à 20 ou 30 mm, ne soit pas généralisée et enregistrée sur tous les postes du bassin. Or, il a été démontré que la majorité des apports solides était due à ces précipitations généralisées.

La fiabilité de l'indice pluviométrique à l'échelle d'un bassin pourra, le cas échéant être améliorée par une cartographie de cet indice basée sur un réseau pluviométrique plus dense.

La relation proposée est de la forme :

$$TSS (T/km^2/an) = 26.62 IL + 5.07 IP + 9.77 CT - 593.56.$$

TSS = transport solide spécifique moyen annuel, exprimé en $T/km^2/an$.

IL = indice lithologique = superficie des formations marneuses et argileuses du Crétacé supérieur et la Tertiaire, exprimée en pourcentage de la superficie totale du bassin.

IP = indice de précipitations érosives = produit du pourcentage des précipitations annuelles tombées sous forme de pluies supérieures à un seuil donné par la fréquence de ces précipitations.

Le seuil considéré est égal à 20 mm pour les bassins imperméables (IL > 50%), et à 30 mm pour les bassins moyennement perméables (IL < 50%).

$$CT = \text{coefficient de torrentialité} = Dd \cdot F_1 = \frac{\sum Lx}{A} \cdot \frac{N_1}{A}$$

Dd. = densité de drainage (longueur totale du réseau fluvial ramenée à l'unité de surface).

N_1 = Nombre des thalwegs élémentaires.

Cette relation empirique, élaborée à partir des données de 30 bassins versants, est statistiquement significative.

Les résultats des tests de STUDENT, tels qu'ils ressortent du tableau 3.7.2 (paliers N^03) sont positifs :

Les valeurs du t de STUDENT correspondant aux coefficients de regression, successivement égales à 5,14, 6,23 et 2,24 sont supérieures à t_{n-k} (95%) et permettent de rejeter l'hypothèse que les coefficients de regression de la population mère sont nuls.

Pour un degré de liberté $n-k = 27$ (avec n = nombre d'observation et k = nombre de variables) t_{27} (95%) = 2.052.

Les variables retenues (IL, IP, CT), peuvent être considérées comme significatives avec un niveau de confiance égal à 95%.

En outre les résultats du test F d'ajustement global de FISHER - SNEDECOR ($F(3,26) = 50.18$) confirment que le coefficient de corrélation multiple est significativement différent de zéro.

Le programme calcule en outre l'écart type résiduel de la regression qui caractérise la fluctuation de la variable dépendante par rapport à l'hyperplan de regression et qui permet de calculer pour une probabilité donnée, l'intervalle de confiance des valeurs estimées par la regression.

Au niveau de confiance $\alpha\%$

$$\overline{TSS} = \hat{TSS} \pm U_{\alpha\%} \sigma_{TSS, IL, IP, CT}.$$

\overline{TSS} = Valeur réelle du transport solide spécifique

\hat{TSS} = Valeur estimée par la regression

$U_{\alpha\%}$ = Variable réduite de GAUSS (probabilité $\alpha\%$)
(= 1.28 pour un niveau de confiance de 80%).

$\sigma_{TSS, IL, IP, CT}$ = Ecart type résiduel de TSS sachant IL, IP et CT.

A un niveau de confiance de 80%, le transport solide spécifique moyen est déterminé par notre relation avec une incertitude de $\pm 500 \text{ T/km}^2/\text{an}$.

Cette incertitude nous paraît acceptable dans l'état actuel des données disponibles, elle doit pouvoir être améliorée avec l'introduction de nouveaux bassins et l'amélioration quantitative et qualitative des données et des documents cartographiques de base.

Basée sur des variables faciles à calculer et disponibles sur l'ensemble du territoire, la relation que nous proposons permet de simuler correctement les transports solides spécifiques moyens annuels supérieurs à $500 \text{ T/km}^2/\text{an}$ à l'exutoire de bassins allant de 100 à 3000 km^2 . Elle présente à ce titre un intérêt évident pour la planification et la conception des aménagements hydrauliques et d'infrastructures. Son utilisation doit rester cependant limitée à la zone Tellienne, sur des bassins comportant un pourcentage de formations marneuses érodables supérieur à 10% et une pluviométrie moyenne annuelle supérieure à 300 mm. La zone des Hautes plaines peu arrosées ($\bar{P} < 300 \text{ mm}$) et la région dominée par les calcaires jurassiques (Monts de TLEMSEN et de SAIDA) restent en dehors des limites de validité de cette relation.

CONCLUSION GENERALE

Les écoulements solides à l'exutoire de grands bassins ($> 100 \text{ km}^2$) en zone semi-aride constituent un phénomène irrégulier, complexe et aléatoire.

Les facteurs mis en jeu sont nombreux et inter-dépendants.

Les mesures sont difficiles et les séries disponibles, lorsqu'elles sont fiables ne sont jamais suffisantes pour constituer des échantillons exhaustifs.

En se basant sur les données observées, durant la période 72/79, sur trente bassins versants de l'Algérie du Nord, particulièrement touchée par l'érosion hydrique, nous avons essayé d'apporter une contribution à la résolution du problème de l'érosion, des transports solides et de la sédimentation des réservoirs, en se fixant comme objectifs prioritaires :

- la compréhension des phénomènes.
- l'élaboration d'outils pratiques, faciles à mettre en oeuvre, susceptibles de répondre aux besoins de la

planification, la conception et la gestion des aménagements hydrauliques.

L'objectif final étant la définition d'une méthodologie de lutte contre l'érosion hydrique et l'envasement de réservoirs.

L'étude est menée en 3 étapes :

Dans une première étape, nous avons procédé à la sélection de 30 bassins représentatifs des différentes conditions physiques, géomorphologiques et climatiques de l'Algérie du Nord, en tenant compte de la qualité des mesures effectuées.

Le dépouillement des données disponibles met en évidence l'existence de lacunes, inévitables dans les séries de débits solides.

Des relations saisonnières entre les débits solides et liquides à l'échelle journalière de la forme ($QS = a \cdot QD$) sont mises au point et permettent de reconstituer les lacunes et d'homogénéiser les séries.

Les précipitations observées sur une dizaine de postes longue durée répartis sur l'ensemble du territoire confirment la représentativité de la période de référence sur l'ensemble de la zone d'étude à l'exception de la région des "COTIERS CONSTANTINOIS".

Le calcul des paramètres statistiques des débits liquides et solides et des facteurs géomorphologiques des bassins étudiés permettent d'effectuer les premiers essais de recherche de liaison entre variables à l'échelle annuelle.

Les résultats obtenus mettent en évidence une forte auto-corrélation entre les variables explicatives (variables géomorphologiques, climatiques et hydrologiques).

Une étude détaillée est alors entreprise sur un cas particulier représentatif de l'Atlas Tellien (bassin de l'oued ALLALAH à SIDI AKACHA) particulièrement touché par l'érosion, comportant des séries d'observation de bonne qualité.

Un échantillon représentatif des différentes conditions d'écoulement a pu être constitué et a permis de mettre en évidence l'intérêt :

- d'aborder le problème à l'échelle de la crue.
- d'associer une étude cartographique des formes d'érosion et des facteurs géomorphologiques à l'analyse hydrologique.
- de séparer les variables mises en jeu.

Un débit solide spécifique étant le produit d'une concentration par une lame ruisselée, notre hypothèse de travail a été de considérer séparément ces 2 facteurs.

L'étude cartographique des facteurs géomorphologiques (lithologie, pente, couvert végétal) montre que la lithologie résume et explique les autres caractères géomorphologiques du bassin. Aux formations lithologiques les plus résistantes (grès, calcaire) correspondent les pentes les plus fortes et les couverts végétaux les plus denses.

Par contre sur les terrains marneux et argileux, peu résistants, le couvert végétal est pratiquement inexistant, les pentes sont faibles et l'activité humaine plus dense.

L'érosion d'origine anthropique (surexploitation des terres, infrastructure routière) vient alors se superposer au processus naturel et accélérer le phénomène.

On voit donc apparaître une corrélation non négligeable entre les formes d'érosion et la lithologie.

On constate que les terrains argileux sur lesquels se développent des vertisols profonds sont le domaine de prédilection des mouvements de masse.

Par contre, l'érosion par entailles linéaires qui se termine souvent par des ravines hiérarchisées et des bad-lands apparaît sur terrain marneux.

L'analyse hydrologique de l'échantillon des crues sélectionnées met en évidence l'intérêt de séparer les crues suivant 2 familles (crues localisées d'Automne et crues généralisées de Printemps).

La recherche de relations entre précipitation, ruissellement et transports solides en considérant séparément la variable concentration moyenne et la variable débit liquide montre que la concentration moyenne d'une crue est un paramètre peu variable, indépendant de la précipitation génératrice, tendant vers une valeur limite lors des ruissellements généralisés. Cette valeur apparaît comme une constante physique du bassin.

Pour les crues localisées, l'examen simultané des couples hydrogrammes-turbidigrammes, montre une liaison entre caractéristiques des hydrogrammes et origine du ruissellement.

Cette constatation nous a amené à une quantification des formes d'érosion.

On montre que les eaux de ruissellement provenant des bad-lands et ravines hiérarchisées sont chargées à 150 g/l et que la zone des mouvements de masses fournit en moyenne 70 g/l.

Une étude sur les apports solides respectifs des crues de printemps et d'automne nous amène à démontrer que la

majorité (80%) des apports sont dus aux crues généralisées de printemps (crues de saturation) et que la contribution des crues d'automne est négligeable ; (Celles-ci contribuent en fait à approvisionner en charge solide les futures crues de printemps).

L'étude statistique des relations précipitation-ruissellement met en évidence une corrélation étroite entre lame précipitée et lame ruisselée pour les crues généralisées de printemps.

Une analyse hydrologique détaillée, combinée à une étude cartographique des facteurs géomorphologiques et des formes d'érosion nous a ainsi permis d'améliorer la compréhension du phénomène de l'érosion et des transports solides et de jeter les bases d'une méthode de prévision des débits solides à l'échelle de l'évènement de crue.

La généralisation de ces résultats aux 30 bassins versants étudiés nous a permis en outre de mettre au point une relation empirique entre paramètres statistiques des apports solides spécifiques moyens annuels et paramètres physico-climatiques des bassins.

Les facteurs les plus significatifs à l'échelle du bassin versant semblent bien être :

- le pourcentage des formations marneuses et argileuses du crétacé supérieur et du tertiaire qui explique l'érodabilité du milieu.

- le pourcentage et la fréquence des précipitations journalières supérieures à un seuil variable (20 ou 30 mm) suivant le degré de perméabilité du bassin, qui explique l'érosivité des précipitations et du ruissellement.

- la densité du réseau fluvial exprimée par le "coefficient de torrentialité" qui traduit l'état de dissection du bassin.

Une relation statistique basée sur une analyse en corrélation multiple hautement significative ($R = 0.923$) est proposée.

La validité de cette relation semble cependant se limiter aux bassins de l'Atlas Tellien comportant un pourcentage marneux érodable supérieur à 10% et une pluviométrie annuelle supérieure à 300 mm.

D'autres résultats particulièrement intéressants obtenus sur terrains Marocain et Tunisien ont pu être confirmés à l'occasion de cette étude.

On constate notamment que l'agressivité des averses selon WISCHMEIER est relativement peu importante en Afrique du Nord (HEUSCH 1970, MASSON 1976) en comparaison des valeurs observées en zone tropicale (ROOSE 1980) et que son influence sur l'érosion est négligeable. Ceci explique la faible contribution de l'érosion en nappe et confirme l'inaptitude dans nos régions des techniques de lutte anti-érosives basées sur les travaux systématiques de banquettes, inefficaces dans la majorité des cas, onéreuses et gênantes pour les travaux agricoles, souvent dangereuses (HEUSCH 1970).

Il apparaît par contre, que dans le domaine de la lutte anti-érosive, une place importante doit être réservée aux travaux de correction torrentielle, les formes d'érosion par entailles linéaires étant en Afrique du Nord celles qui contribuent le plus à fournir des sédiments. (L'implantation par exemple d'écrans végétaux susceptibles d'une certaine utilisation par les populations rurales apparaît comme une solution intéressante qu'il convient d'encourager).

Tout au long de ce travail, nous avons essayé d'exploiter au maximum les informations mises à notre disposition.

Des lacunes existent : nous en sommes conscients. Elles sont inévitables dans les conditions actuelles des données disponibles.

Bien que nous disposions d'un grand nombre de données sur les concentrations des solides en suspension sur toute la région d'étude, nos évaluations concernant le débit solide total ne peuvent être qu'approximatives étant donné l'absence de données sur le charriage de fond.

Il s'agit là, d'une source d'erreur non négligeable : Le charriage ne constitue pas un pourcentage constant des apports en suspension, comme cela est généralement admis. La contribution du charriage aux apports solides peut varier en fonction des conditions géomorphologiques et de la taille du bassin.

Des mesures effectuées en Tunisie, sur le barrage du MELLEGUE (CLAUDE et CHARTIER, 1974) montrent sur un bassin de 10.000 km^2 que le charriage constitue 24% des apports en suspension.

On peut s'attendre à des proportions plus importantes sur des bassins de superficie plus faible, à relief accentué.

Une autre source d'erreur provient de l'hétérogénéité des documents cartographiques de base (lithologie, chevelu hydrographique) qui se répercute sur la précision et la fiabilité du calcul des paramètres géomorphologiques.

L'absence d'une cartographie de l'occupation du sol couvrant l'ensemble de la zone d'étude ne nous a pas permis de tenir compte de ce facteur important de l'érosion.

La représentativité de la période 72/79 a pu être vérifiée à partir des données sur les précipitations et écoulements annuels.

Cependant, l'absence de liaison bien définie entre précipitations et écoulements annuels d'une part et transports solides, d'autre part, la forte irrégularité interannuelle des débits solides qui fluctuent d'une année à l'autre dans des proportions de 10 à 60, laissent planer un doute quant à la représentativité de la moyenne sur les transports solides calculée sur cette période.

Aussi, nous pensons que les résultats obtenus, doivent pouvoir être améliorés au fur et à mesure que de nouvelles données seront disponibles.

Avec la mise au point de méthodologies d'études appropriées (bassins versants expérimentaux), l'apparition de nouvelles techniques de mesures (techniques nucléaires), l'introduction des techniques modernes d'études et de cartographies automatiques des paramètres physiographiques (télé-détection) de nouvelles voies se dessinent, des outils se mettent en place et des solutions apparaissent à certaines questions jusqu'ici inabordables.

Un programme important de recherche a été entrepris dans ce but en Algérie par l'Institut National des Ressources Hydrauliques :

1.- Une dizaine de micro-bassins expérimentaux (20 ha) implantés et équipés dans le bassin versant de l'ISSER Algérois, en fonction de la représentativité des formes d'érosion qui s'y développent doivent permettre au cours des 5 prochaines années :

- de quantifier avec précision les principales formes d'érosion susceptible de se développer en zone semi-

aride sur marnes et argiles du miocène et sur schiste du crétacé supérieur.

- de mesurer l'efficacité de différents traitements anti-érosifs.

2.- Une étude de reconnaissance des formes d'érosion à partir de photosaériennes et restitution cartographique sur les bassins aménagés ou en voie d'aménagements est actuellement en cours de réalisation et servira de base pour la définition d'un programme d'intervention prioritaire.

3.- Une campagne systématique de mesure bathymétrique, de sondage, de carottage et d'analyse des sédiments sur des barrages envasés, disposant d'un contrôle hydrologique correct a été entreprise et devra permettre :

- une étude sur le comportement sédimentologique et la nature des dépôts en liaison avec les caractéristiques du bassin versant (tassement, densité, granulométrie, minéralogie).

- une étude comparative des différentes méthodes de mesures et de leurs imprécisions.

- une estimation correcte de l'importance des transports solides par charriage.

Depuis plusieurs décennies, chercheurs et ingénieurs des pays de la zone méditerranéenne et plus particulièrement du MAGHREB conscients de la gravité du phénomène de l'érosion et de ses conséquences, multiplient les actions d'étude, de recherche et d'expérimentation sur ce phénomène afin de mieux le combattre.

Par la variabilité des conditions physiques, climatiques et socio-économiques, le Maghreb offre un vaste champ d'étude sur les divers aspects de ce phénomène.

Les résultats obtenus jusqu'à présent, sont encourageants et doivent être précisés au fur et à mesure que de nouvelles données seront disponibles.

Une coordination des actions dans ce domaine essentiellement pluri-disciplinaire est indispensable.

Une telle coordination qui s'amorce actuellement à l'échelle Maghrebine à l'occasion des projets régionaux initiés en collaboration avec le programme des Nations Unies pour le développement doit se développer et s'étendre à d'autres pays. L'enjeu est important car il s'agit dans cette région de l'avenir et de la survie des générations futures.

BIBLIOGRAPHIE

BANNOUR (H), BONVALLOT (J), HENTATI (A), SELMI (S), 1980 -
Etude de l'érosion en Tunisie du Nord et du
du Centre.
Sols de Tunisie - Bulletin de la division des
sols - DRES - TUNIS N°11, 95 p. 1carte 1/200.000.

BECHTEL Incorporated, 1975 - Développement des ressources en
eau et de l'agriculture - Région de SEIIF -
Etude préliminaire et conditions de réalisation -
Ministère de l'Industrie et de l'Energie - ALGER.
Tome 2 - Contrôle de la sédimentation et de l'éro-
sion - pp 2-1, 2-95, 16 fig.

BEDIOT (G), 1966 - L'érosion des sols - thèse de Doctorat de
3ème cycle - Institut de Géog. Fac. des lettres
et sciences humaines - BESANCON 3 T, 471 p, 110fig.

BENCHETRIT (M), 1972 - L'érosion actuelle et ses conséquences
sur l'aménagement en Algérie - Presse universitaire
de France - 216 p., 28 fig.

- BERKE (B), RAKOCZI (L), 1981.- Latest achievements in the development of nuclear suspended sediment gauges - Erosion and sediment transport Measurement. Proceedings of the Florence symposium, June 1981, IAHS publ. N°133, pp.91 - 96.
- BILLON (B), 1968.- Mise au point des mesures de débits solides en suspension - République du Tchad. Cahiers ORSTOM - Hydrologie 1968. Vol V, N°2, pp.3-13
- BONVALLOT (J), HAMZA (A), 1977.- Causes et modalités de l'érosion dans le bassin versant inférieur de l'oued EL-HADJEL (Tunisie Centrale) - Erosion and solid matter transport in Inland waters. (Proceedings of the Paris Symposium July 1977 - UNESCO - AISH Publ. N°122, pp. 260 - 277.
- BRUSHIN (J), 1971.- Transports solides en suspension dans les rivières Suisses - Bulletin technique de la Suisse romande N°14, 7 p.
- CAPOLINI (J), 1965.- Bassin versant de l'oued FODDA - Etude géomorphologique - Etude S.E.S 1080/GE/G. 9 p.
- CAPOLINI (J), 1967.- Etude géomorphologique des conditions d'envasement du port de GHAZAOUET - Etude S.E.S 1013/DH2, ALGER, 16 p, 8 pl.
- CAPOLINI (J), 1967.- Bassin versant de l'oued FODDA - Carte de sensibilité à l'érosion. - Etude S.E.S ALGER, 6 p 1 carte 1/50.000.
- CAPOLINI (J), PIEYNS (S), 1968.- Etude géomorphologique préliminaire au projet d'étude hydrologique - bassin versant de l'oued CHEMORAH - Etude S.E.S N°23/14, ALGER 12 p.

- CAPOLINI (J), 1968.- Bassins versants des oueds RHIOU et FODDA-
Etude géomorphologique et morphométrique - Etude S.E.S
N°13/17/DH2, ALGER, 29 p, 11 pl. 38 fig.
- CAPOLINI (J), PIEYNS (S), RAMANA (R), 1969.- Bassin versant du
CHELIFF : Oued RHIOU, SLY, FODDA, DEURDEUR, ZEDDINE,
EBDA : Prévision des apports, des crues et des débits
solides - Etude S.E.S N°13/12/DH2, ALGER, 41 p, 1 car-
te, 34 fig.
- CAPOLINI (J), SARY (M), 1969.- Etude géomorphologique du CHOTT
HODNA - Zone Nord.- Etude S.E.S./DH2/1969, Alger, 20p.
- CAPOLINI (J), SARY (M), 1970.- Méthodologie et technique de
l'étude des paramètres du milieu physique intégré
dans le bassin versant - les pentes.
Etude S.E.S, DH, 70, Alger, 16 p.
- CARRE (P), 1972.- Quelques aspects du régime des apports flu-
viatiles des matériaux solides en suspension vers le
lac Tchad.- Cahier ORSTOM - Hydrologie 1972.
Vol IX N°1, pp. 19-45.
- CENTRO STUDI RICERCHE, 1974.- Etude des bassins versants des
oueds ISSER et SIKKAK - R.A.D.P. - Wilaya de TLEMCEM.
Sous direction des forêts et DRS - TLEMCEM, 3T, 640 p.
- CICCACCI (S), FREDI (P), LUPIA PALMIERI (E), 1979.- Quantitative
expression of climatic and géomorphic factoro affecting
érosional processes : indirect determination of the
amount of erosion in drainage basins in Italy.
Proceeding Polish - Italian Seminar on superficial Mass
Movements in Mountain regions - SZIMBARK, may 1979,
pp. 76-88.
- CLAUDE (J), CHARTIER (R), 1977.- Mesure de l'envasement dans les
retenues de six barrages en Tunisie, campagne de 1975 -
Cahier ORSTOM, vol XIV N°1 - 1977, pp. 3-35.

CLAUDE (J), LOYER (J.Y), 1977.- Les alluvions déposées par l'oued MEDJERDAH lors de la crue exceptionnelle de Mars 1973 en Tunisie - Aspects quantitatifs et qualitatifs du transport et du dépôt - Erosion and solid matter transport in inland waters - Proceedings of the PARIS symposium, July 1977 - UNESCO - AISH., public. N°122 - pp. 211 - 218.

COLOMBANI (J), 1967.- Contribution à la méthodologie des mesures systématiques de débits solides en suspension. Cahier ORSTOM - Hydrologie 1967 - Vol IV. N°2, pp. 27 - 36.

COLOMBANI (J), 1977.- Effet sur les transports solides des ouvrages hydrauliques en Afrique du Nord - Erosion and solid matter transport in inland waters (Proceedings of the PARIS symposium July 1977) - UNESCO - AISH - public N°122, pp. 295 - 300.

COLOMBANI (J), FRITSCH (J.M), SUSINI (J), 1981.- Dispositif de prélèvement automatique d'un échantillon moyen de transport solide en suspension pondéré en fonction du débit, et dispositif de mesure par électrodes spécifiques de concentrations en solutes - Erosion and sediment transport Measurement (Proceedings of the Florence symposium, June 1981) - IASH pub. N°133, pp. 131 - 136.

CORMARY (Y), 1971.- Problèmes de mesures de débits solides en suspension - Polycop. - Faculté des services de MONTPELLIER - Hydrométéorologie 1971.

COYNE et BELLIER, 1973.- Etude géomorphologique du bassin de la SOUMMAM - Université LOUIS PASTEUR - Centre de Géographie appliquée - STRASBOURG - 124 p., 27 cartes, 13 fig.

- DEFFONTAINES (J.P), DE MONTARD (F), 1968.- Essai d'appréciation du danger d'érosion dans les vergers de fortes pentes en moyen Vivarais Annales agronomiques INRA, 1968, Vol. 19 N°3, pp. 349 - 364.
- DEMMAK (A), 1980.- Contribution à l'étude des écoulements solides des cours d'eau d'Algérie - 1ère partie -
Mise en forme des données de base - bilan de sept années de mesures - Etude N°126, SHYL - INRH - ALGER, 41 p., 3 fig., 1 carte.
- DEMMAK (A), 1982.- Contribution à l'étude des écoulements solides des cours d'eau d'Algérie - 2ème partie -
Etude d'un cas particulier : Le bassin de l'oued ALLALAH à SIDI AKACHA. - Etude N°182 SHYL - INRH - ALGER, 57 p. 47 fig.
- DENIAUX (B), 1971.- Sédimentation de lacs de barrage - transport expérimental de sable naturel et radioactif -
Thèse Doc. 3ème cycle - Fac. sci. Univ. CAEN, 127 p., 42 fig.
- DERI (J), HUSSON (A), 1976.- Etude hydrologique pour un aménagement des bassins de l'oued BOUDOUAOU et HAMIZ.
Etude N°70/SSHHC/76 - ALGER, 96 p., 20 fig.
- DUHAMEL (P.L), 1970.- Transport solide et sédimentation -
Annales de la recherche forestière au Maroc.
Tome 12 - pp. 289 à 390.
- DUQUENNOIS (H), 1955.- Lutte contre la sédimentation des barrages réservoirs - Compte rendu N°2 - EGA - Service des études générales et recherches.

FLEMING (G), FATTORELLI (S), 1981.- Data requirements for
sédiment, érosion and transport simulation -
Erosion sédiment transport Measurement (Proceedings
of the FLORENCE symposium, June 1981) IAHS - Publ.
N°133, pp. 321 - 331.

FOURNIER (F), 1960.- Climat et érosion - La relation entre
l'érosion du sol par l'eau et les précipitations
atmosphériques - P.U.F, PARIS, 201 p., 15 fig.

GAZZOLO (T), BASSI (G).- Contribution à l'étude de degré
d'érosion des sols constituant des bassins versants
des cours d'eau Italiens - Publ. N°53 de l'AISH.
Commission d'Erosion Continentale, pp. 112 - 134.

GEISSERT (D), METTAUER (H), SAADI (A), SABA EL GHOSAIN (T),
SCHWING (J.F), VOGT (H), 1981.- Méthodes de zonation
de l'intensité de l'ablation par traitement de données
cartographiques. Séminaire de PROPRIANO sur la gestion
régionale des sédiments - Mai 1981. Doc. BRGM N°30,
pp. 173 - 178.

GUIGO (M), 1975.- Les variations de la turbidité et leurs rela-
tions avec le débit et les précipitations sur le MAGRA
fleuve de la Ligurie Orientale - Rev. Géogr. phys. et
Géol. dyn., PARIS - VOL XVII, Fasc.3, pp. 259-278.

HAROLD (P), GUY and VERNON W. NORMAN, 1970.- Field methods for
measurement of fluvial sediment - techniques of water-
Resources investigations of the united states Geolo-
gical Survey - Book 3 chapter C₂ (59 p).

HEUSCH (B), 1970.- L'érosion du pré-réf - Une étude quantitati-
ve de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses d
pré-réf occidental.
Extrait du rapport 1970 - Tome 12 de la station de
recherches forestières de RABAT, 176 p, 21 fig, 6 cart

HEUSCH (B), 1971.- L'érosion hydraulique au Maroc - son calcul et son contrôle. - EL AWAMIA, N°22 - RABAT 1971.

HEUSCH (B), MILLIES LACROIX (A), 1971.- Une méthode pour estimer l'écoulement et l'érosion dans un bassin - Application au Maghreb - Mines et géologie N°33, RABAT 1971.

HEUSCH (B), 1977.- Quantification des processus érosifs à partir d'une analyse cartographique du bassin de SEFID RUD (IRAN).
1er Colloque PEDOLOGIE-TELEDETECTION - AISS - ROME 1977 - 8 p.

HEUSCH (B), CAPOLINI (J), 1981.- Etude de l'érosion et des transports solides en zone semi-aride.
Implantation des bassins expérimentaux, définition des dispositifs de mesure - Octobre 81 - INRH-SOGREAH, 46 p.

HIRSCH (F), 1962.- Méthode de prévision des débits des crues d'eau par l'analyse morphométrique des réseaux fluviaux - Revue de géomorphologie dynamique, XIII, N° 7-8-9. - V. 1962 - page 97 - 106.

HUDSON (N.W), 1981.- Instrumentation for studies of the erosive power of rainfall - Erosion and sediment transport measurement (proceedings of the Florence symposium, June 1981) IAHS -pub. N°133, pp.383 - 390.

HUSSON (A), 1975.- L'érosion dans le bassin versant de l'oued DJIDJIOUA - Approche géomorphologique - Etude N°49/SHYL, 24 p., 1 carte 1/200.000.

HUSSON (A), 1975.- Coefficient de torrentialité et géomorphologie dynamique. Leur apport à l'étude des bassins versants. - NT. N°5 /SHYL - ALGER, 18 p., 1 fig.

HUSSON (A), 1975.- Les transports solides de l'oued EL HARRACH à ROCHER DES PIGEONS - Approche géomorphologique. NT. N° 57/SHYL/75, 29 p., 1 carte 1/50.000, 4 fig.

HUSSON (A), 1976.- Les transports solides de l'oued LEHAM au PONT DE LA ROCADE (Bassin du Chott HODNA). Etude N° 61/SHYL/76, 31 p., 6 fig.

HYDROTECHNIC-CORPORATION, 1970.- Ressources en eau de surface de l'Algérie et possibilité de leur aménagement, Bassin du CHELIFF et Cotier DAHRA. Hydrotechnic-corporation - NEW-YORK - 230 p., 5 cartes, 21 fig.

JOHNSON (GM), 1980.- Mesures à prendre lors de la conception d'ouvrages de retenue, pour lutter contre l'envasement. Séminaire international d'expert sur le dévasement des retenues, TUNIS, 1 au 4/07/80, 9 p.

KALMAN (R), 1976.- Etude expérimentale de l'érosion par griffes. Revue de géogr. phys. et de Géol. dyn. - Vol XVIII - fasc 5, pp. 395 - 406 - PARIS 1976.

KALMAN (R), 1978.- Modélisation des débits solides. Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen. - Univ. Louis PASTEUR - STRASBOURG - pp. 189 - 194.

KROOK (J.O), 1973.- Régularisation globale des débits dérivables des oueds ISSER et HAMIZ par un barrage sur l'oued BOU DOUAOU et compte tenu du barrage du KOUDIAT ACERDOUN - Etude 73/012 - DEMRH, 38 p., 4 fig.

KROOK (J.O), 1973.- Etude hydrologique de faisabilité des barrages de FONTAINE DES GAZELLES et KHANGA SIDI NADJI. Etude 73/SHYL/015 - DEMRH, 33 p., 14 fig.

- L.C.H.F., 1964.- Etudes des phénomènes de sédimentation dans les retenues de barrage de l'oued FODDA.
Résultats des analyses effectuées en vue de déterminer l'origine des sédiments de la retenue - SEGTH - ALGER-
Déc. 1964 - 22 p., 7 fig.
- L.C.H.F., 1964.- Barrage du HAMIZ : Etude bibliographique et théorique de la capacité de transport par les courants.
S.E.G.T.H.- ALGER, (3 parties, 110 p., 49 fig.).
- LENKEI (T), 1975.- Etude hydrologique de l'oued EL ARAB au site de BOU-REHMANE - Etude 53/SHYL/75. - 9 p., 7 fig.
- LICITRI (R), 1970.- Calcul du transport solide et du transport salin d'un oued.
S.E.H. - S.E.S., ALGER, 15 p.
- LICITRI (R), 1970.- Note sur les débits de crues et les transports solides des oueds EL HARRACH et BOU ROUMI.
Etude S.E.S. 15/11/DH2 - S.E.H., 12 p.
- MASSON (JM), KALMS (JM), 1971.- Analyse et synthèse des facteurs de l'érosion sur le bassin versant de la TET à VINCA (P.O). Labo. Hydrologie - USTL - MONTPELLIER).
90 p., 1 carte.
- MASSON (JM), 1976.- Mesure de l'agressivité des pluies en rapport avec l'érosion des sols.
L.H.H. - USTL - MONTPELLIER.
- MASSON (JM), 1977.- Définition d'une méthodologie d'analyse régionale des débits moyens - Objectifs et plan d'étude.
Rapport 19/77 - DEMRH - ALGER.
- MEDINGER (G), 1960.- Transport solide des oueds Algériens.
Annuaire hydrologique de l'Algérie - Année 50/59.
Mars 1960.

MESSER (T), 1978.- L'érosion du sol dans le vignoble alsacien.
Etude du facteur climatique et Etude expérimentale.
Thèse 3ème cycle, Univ. LOUIS PASTEUR - STRASBOURG,
131 p., 16 fig.

MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE LA REVOLUTION AGRAIRE, 1979.-
Etude d'inventaire des terres et forêts de l'Algérie
du Nord. - Wilaya d'EL-ASNAM - ALGER 1979.

NOUVELOT (JF), 1969.- Mesure et étude des transports solides
en suspension au CAMEROUN.
Cahier ORSTOM - Série Hydrologie - Vol.VI N°4 pp.43-85.

NOUVELOT (JF), 1972.- Méthodologie pour la mesure en réseau des
transports solides en suspension dans les cours d'eau
inter-tropicaux peu chargés.
Cahier de l'ORSTOM - Série hydrologie - Vol. IX N°1
1972 - pp. 3-18.

NOUVELOT (JF), 1972.- Le régime des transports solides en sus-
pension dans divers cours d'eau du CAMEROUN de 1960
à 1971.
Cahier de l'ORSTOM - Vol. IX N°1 - 1972 - pp. 47-74.

POROSZLAI, 1975.- Etude de faisabilité d'un barrage sur l'oued
EL HACHEM.
Etude N° 41/SHYL - ALGER, 27 p. 10 fig.

PORTERFIELD (G), 1972.- Computation of fluvial - Sediment Dis-
charge techniques of water - Resources investigations
of the United States Geological Survy - BOOK 3 -
Chapter C3, 66 p.

REMY-BERZENCOVITCH (E), 1959.- Nouvelle méthode de calcul du
débit solide des cours d'eau. Österreichische Wasser-
wirtschaft - Mars 1952 - pp. 59-66 (traduction N°606
EDF/Chatou).

210

ROBINSON (AR), 1977.- Relationship between soil erosion and delivery - Erosion and solid matter transport in Inland waters (Proceedings of the PARIS symposium, July 1977) UNESCO - AISH publ. N°122, pp. 159-167.

ROOSE (E), 1980.- Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sans végétations naturelles ou cultivées. Thèse Doct. es-sciences Fac. Sci. Univ. ORLEANS, 587 p.

SACCARDY (L), 1949.- Notions générales sur la lutte contre l'érosion en Algérie. Revue Terres et eaux N°9 - 1949.

SAMIE (C), 1960.- Etude hydrologique du bassin de l'oued ALLALAH. NT/02/02/60, S.E.S - ALGER, 5 p., 3 fig.

SARVARY (I), 1978.- Etude de l'ensemble de la retenue du K\$0B. Etude N° 82/SHYL/78, Avril 78 - 37 p., 12 fig.

SCET - TUNISIE, 1980.- Erosion par les eaux continentales et transport solide dans les cours d'eau en Tunisie - Essai de synthèse - Réf. NT 80.1 (53 p).

SJOBERG (S), 1973.- Volumes régularisables par le barrage en projet de ZIT EMBA sur l'oued EL HAMMAM. Etude N° 73/SHYL/07, 6 p., 6 fig.

SOGETHA-SOGREAH, 1969.- Etudes générales des aires d'irrigation et d'assainissement agricole en Algérie. Dossier O. Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire, ALGER, 164 p.

THEVENIN (J), 1960.- La sédimentation des barrages réservoirs en Algérie et les moyens mis en oeuvre pour préserver les capacités.

Annales de l'I.T.B.T.P. N° 156 - Décembre 1960.

THEVENIN (J), 1960.- Le percement du barrage STEEG sur l'oued FODDA pour l'aménagement d'orifices de dévasement et de vidange - Terres et eaux N°34 - 1960 - pp. 2-22.

TIXERONT (J), BERKALOFF (H), 1958.- L'évaluation de l'érosion en Tunisie.

C/R de l'Assemblée de l'AIHS de TORONTO 1957-1958.

TIXERONT (J), 1960.- Débit solide des cours d'eau en Algérie en Tunisie.

Assemblée Générale d'HELSINKI 25/7 au 6/8 1960.

AIHS - Pub. N° 53 - pp. 26-41.

TIXERONT (J), 1960.- Taux d'abrasion et teneur en suspension des cours d'eau d'Algérie et de Tunisie.

Secretariat d'Etat à l'Agriculture - TUNIS - ronéo - 31 p.

VIVIAN (H), 1981.- Erosion et transports solides dans le bassin du Drac au SAUTET - Séminaire national de PROPRIAN sur la gestion régionale des sédiments - Mai 1981.

Documents B.R.G.M., N°30, pp. 349-358.

VUILLAUME (G), 1968.- Premiers résultats d'une étude analytique du ruissellement et de l'érosion en zone Sahélienne

Bassin représentatif du KOUNTKOUZOUT (Niger).

Cahiers de l'ORSTOM série hydrologie, Vol V, N° 2, pp. 33-46.

VUILLAUME (G), 1969.- Analyse quantitative du rôle du milieu physico-climatique sur le ruissellement et l'érosion à l'issue de bassins de quelques hectares en zone Sahélienne (Bassin de KOUTKOUZOUT - Niger). Cahiers de l'ORSTOM, Vol VI, N° 4, pp. 67-131.

WALLING (D.E), 1977.- Limitations of the rating curve technique for estimating suspended sediment loads, with particular reference to British rivers - Erosion and solid matter transport in Inland waters (proceedings of the PARIS Symposium, July 1977). UNESCO - AISH - Pub. N° 122, pp. 34-48.

WALLING (D.E), KLEO (A.H), 1979.- Sédiment yields of rivers in areas of low précipitation : a global View - The hydrology of areas of Low précipitation - Proceedings of the Canberra symposium - Déc. 1979 - AISH publ. N° 128.

WALLING (D.E), WEBB (B.W), 1981.- The reliability of suspended sediment load data. Erosion and sediment transport Measurement (Proceeding of the Florence symposium, June 1981) IAHS - Publ. 133 - pp. 177-194.

WILLIAMS (J.R), 1977.- Sédiment delivery ratio determined with sediment and runoff models - Erosion and solid Matter transport in Inland waters (Proceedings of the PARIS Symposium, July 1977) - UNESCO - AISH - Publ. N°122, pp. 169-179.

WILSON (L), 1977.- Sediment yield as a function of climate in united states rivers. Erosion and solid Matter transport in Inland waters (Proceedings of the PARIS symposium, July 1977) - UNESCO - AISH - Publ. 122, pp. 82-92.

WITZIGMAN (F.S), 1963.- Un équipement automatique d'échantillonnage de débit solide et de méthodes rapides d'analyse. - Colloque de BARI, 1963, p. 337.

W.M.O., 1981.- Measurement of river sediments.
Opérationnal Hydrology - Rep. N° 16 WMO - N° 561
GENEVA, 61 p.

YUGIAN (L), GUISHY (X), 1981.- Sédiment measurement in the yellow river - Erosion and sédiment transport measurement (proceedings of the FLORENCE symposium, June 1981 - IAHS - AISH Publ. N°133 - pp. 275-285.

ZHI (L), YUREN (L), LELING (S), XIANGLIN (X), YUJING (Y), LINGWI (K), 1981.- The development of nuclear sediment concentration gauges for use on the yellow river - Erosion and sediment transport measurement (Proceedings of the FLORENCE symposium, June 1981) IAHS publ. N° 133 - pp. 83-90.